

文章编号:1002-2082(2015)04-0580-04

泵浦光的入射角对参量下转换的影响

夏茂鹏, 高冬阳, 李健军, 胡友勃, 郑小兵

(中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要:利用参量下转换制备相关光子实现对各类探测器的量子效率的定标,是近年来兴起的新型定标技术。由于参量下转换的光子转换效率低,探测器输出信号信噪比小。采用短波激光器泵浦 PPLN 周期极化性晶体,可获得较大功率的参量光。分析了泵浦光在 PPLN 晶体端面的入射角对参量光的转换效率、空间分布、参量带宽及晶体周期的影响,并进行了数值模拟。分析发现当泵浦光正入射晶体端面时,参量光功率转换大,带宽小,发散角大;随着泵浦光入射角度逐渐增大,参量下转换的转换效率降低,相关光子的带宽变小,发散角变小且参量光的中心波长的空间位置会发生相对偏移。该研究结果可为相关光子探测、模拟探测器量子效率的高精度定标提供理论依据。

关键词:参量下转换;量子效率;定标;空间分布

中图分类号:TN24

文献标志码:A

doi:10. 5768/JAO201536. 0403004

Influence of incident angle of pumped beam on parametric down conversion

Xia Maopeng, Gao Dongyang, Li Jianjun, Hu Youbo, Zheng Xiaobing

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS, Hefei 230031, China)

Abstract: Calibration for the quantum efficiency of detectors is a new research subject. Spontaneous-parametric-down-conversion (SPDC) has the disadvantages of low conversion efficiency and signal noise ratio (SNR). In order to improve the power of correlation photon, a short-wave laser was used to pump the periodically poled lithium niobate (PPLN) crystal. The influence of incident angle on the conversion efficiency, spatial distribution, bandwidth and crystal poling period was analyzed based on numerical simulation. It is proved that the conversion efficiency is high, the bandwidth of correlation photon is narrow and the divergence angle is large for normal incident pumped beam. While the incident angle increases, the conversion efficiency becomes lower, the bandwidth and divergence angle are smaller and the position of central wavelength can shift. The result presented is a theoretical support for correlated photon detection and highly accurate calibration for quantum efficiency of detector.

Key words: parametric down conversion; quantum efficiency; calibration; spatial distribution

引言

利用自发参量下转换相关光子的时间、偏振、

频率和自旋等具有的相关特性建立辐射绝对基准,实现光电探测器可见波段的量子效率的定标,

收稿日期:2014-11-18; **修回日期:**2015-04-13

基金项目:国防技术基础项目(J2920130004、J312013A0001);国家自然科学基金项目(11204318、61275173)

作者简介:夏茂鹏(1987—),男,湖北黄冈人,博士研究生,主要从事光学遥感器高精度辐射定标技术研究。

E-mail: xmp0701211@163.com

通信作者:郑小兵(1969—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事光学精确测量的先进方法与仪器、卫星光学传感器的高精度定标、光学遥感和海洋光学等方面的研究。E-mail: xbzheng@aiofm.ac.cn

是近年来兴起的新型定标技术^[1-4]。目前利用相关光子对探测器的可见波段进行绝对定标,其定标结果可与传统定标手段相比拟^[5-8]。

随着光学遥感对宽波段、高分辨率要求的提高,利用相关光子的方法,实现从可见波段扩充到红外波段定标以及从对光子计数型探测器定标转换为对电荷累积型模拟探测器定标方面都十分必要。采用周期极化 PPLN 晶体自发参量过程所产生的相关光子为上述目标的实现带来了新的曙光。PPLN 晶体具有大的非线性系数以及准相位匹配的方式,可保证高通量的纠缠光源输出,利用温度调谐的方式,可实现相关光子的宽波段调谐。实现光电探测器的量子效率高精度定标,需知所产生的相关光子光谱信息。

目前,对于泵浦光为高斯光束,其产生的相关光子的空间分布测量方法,国内外已有相关报道,但是其理论推导模拟值和实验值总存在较大的差异,文中没有给出具体的理论推导和解释^[9-13]。为了解决上述问题,本文从理论上严格推导并考虑相位失配、泵浦光小角度偏离对信号光的中心波长、输出带宽以及信号光的空间分布角的影响,该结果为相关光子高精度定标和 OPO 激光器的研究提供了理论和实验依据。

1 理论模型

采用周期极化晶体来实现准相位匹配^[13],需要对晶体的自发极化方向进行周期性调制,利用晶体周期每隔奇数倍反转一次,可使参量光相干叠加增强。准相位匹配条件可以表示为

$$\frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{\lambda_3} \quad (1)$$

$$\Delta k = k_1 - k_2 - k_3 - k_m \quad (2)$$

式中: Δk 为三波在传播过程中的波矢相位失配量; λ_j 、 k_j ($j=1,2,3$) 分别为泵浦光、信号光和空闲光的波长是波矢。

对于 e 偏振的泵浦光在 PPLN 晶体中的折射率可由塞耳迈耶尔方程表示为

$$n_e^2 = a_1 + b_1 f + \frac{a_2 + b_2 f}{\lambda^2 - (a_3 + b_3 f)} + \frac{a_4 + b_4 f}{\lambda^2 - a_5^2} - a_6 \lambda^2 \quad (3)$$

$$f = (T - T_0)(T + T_0 + 2 \times 273.16) = (T - 24.5)(T + 570.82) \quad (4)$$

式中: T 为晶体的温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$; λ 为光波波长;

$a_1 \sim a_6$ 和 $b_1 \sim b_6$ 为折射率参数,文献[14]中给出了各参数的具体取值。

实际上,晶体为负单轴晶体,随着泵浦光在晶体内的角度不同,其泵浦光的折射率会发生相应的改变,会导致晶体的调制周期函数随着泵浦光的角度的变化。随着入射角的变化,其晶体的周期调制函数会发生变化^[15],如图 1 所示。

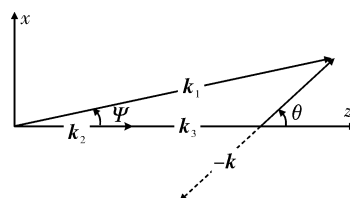


图 1 准相位匹配过程失配量与角度 θ 关系示意图

Fig. 1 Relationship between phase-mismatching and angle θ in quasi-phase matching

在图 1 中, k_j ($j=1,2,3$) 分别表示泵浦光、信号光、空闲光波矢; ψ 表示泵浦光的偏转角度; k 表示晶体的不同角度的周期调制相移; θ 表示空间调制函数 k 与相关光的夹角。

对图 1 中的矢量匹配图中分析可知:根据矢量三角形正弦定理和余弦定律可得准相位匹配的空间调制函数 k 与输入角 θ 的关系式,利用三角形的正弦定律和水平动量守恒可得:

$$\frac{k_1}{k} = \frac{\sin \theta}{\sin \psi} \quad (5)$$

$$k_1 \cos \psi = k_2 + k_3 + k \cos \theta \quad (6)$$

联立(5)、(6)式可得晶体的周期与角度 θ 的关系如下:

晶体的周期

$$\Lambda = \frac{2\pi}{\sqrt{k_1^2 - (k_1 + k_2)^2 \sin^2 \theta - (k_2 + k_3) \cos \theta}} \quad (7)$$

当泵浦光的入射角为 0° 的时候,晶体的周期为 $\frac{2\pi}{k_1 - k_2 - k_3}$,这与(3)式的计算结果一致。根据(7)式可知,为了满足相位匹配条件,对于已经切割好的晶体,不同的角度 θ 存在不同的相位调制函数。下面将从 3 个方面分析,泵浦光入射角度对相关光的空间分布、相关光的空间带宽的影响。

2 数值模拟及结果

2.1 理想条件下信号光输出光谱范围

首先考虑在理想条件下(泵浦光为理想单色光,理想高斯光束,实验室温度恒定)有一定的相位失陪量,三波共线情况下,获得参量光的带宽^[13]。

当波长偏离中心波长 λ_s , 使得 $\Delta k = 2.783/L$, 该波长转换效率是中心波长转换效率的 50%, 则

信号光波长调节带宽为 $\Delta\lambda_s = 2\delta\lambda_s$ 。对(2)式两边对 λ_s 微分, 整理后可得:

$$\Delta\lambda_s = 2\delta\lambda_s = \frac{2.783}{\pi L} \left[\left(\frac{1}{\lambda_s} - \frac{1}{\lambda_p} \right) \frac{\partial n_i(\lambda_i)}{\partial \lambda_i} \frac{\partial \lambda_i}{\partial \lambda_s} - \frac{1}{\lambda_s} \frac{\partial n_s(\lambda_s)}{\partial \lambda_s} + \frac{n_s - n_i}{\lambda_s^2} \right]^{-1} \quad (8)$$

由于本文利用 532 nm 泵浦 PPLN 晶体产生 631 nm 和 3.39 μm , 当信号光的中心波长 $\lambda_s = 631 \text{ nm}$, 其带宽为 0.234 nm, 其带宽小于 0.1 nm, 空闲光的带宽为 4 nm。该结果与实验值有一定的差异。

实际上, 泵浦光不是严格准直入射到非线性晶体, 其输出光谱带宽会随着泵浦光的入射角发生变化。从下面两个方面考虑: 第一种泵浦光有一定的入射角, 并且存在小量的相位失配, 相关光共线输出的情况; 第二种是泵浦光准直入射, 相关光有一定的角度输出的情况。

2.2 泵浦光以一定的角度入射相关光子共线输出

如果泵浦光入射晶体与晶体的前端面的法线(z 轴方向)有一定的夹角, 并假设 $\mathbf{K}_s$ 和 $\mathbf{K}_i$ 一直共线, 可采用图 2 方式计算出信号光和空闲光的输出角度及输出波长。

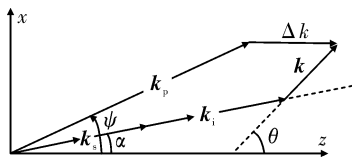


图 2 相关光输出波长与出射角度示意图

Fig. 2 Schematic diagram of output wavelength and angle of signal light

图 2 中 Δk 表示相位失配量; α 、 ψ 分别表示相关光子矢量 $\mathbf{K}_s$ 与 $\mathbf{K}_i$ 和泵浦光波矢 $\mathbf{K}_p$ 与 z 轴夹角; θ 表示晶体的空间调制函数波矢 $\mathbf{K}$ 与 z 轴的夹角。

假设泵浦光在某一个入射角 ψ 下, 在不同的 θ 下, 根据参量下转换的能量守恒和水平方向的动量守恒, 利用参量下转换过程的能量守恒, 可得:

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_i} \quad (9)$$

在水平方向动量守恒可得:

$$(k_s + k_i) \cos \alpha + k \cos \theta - k_p \cos \psi \leq \Delta k \quad (10)$$

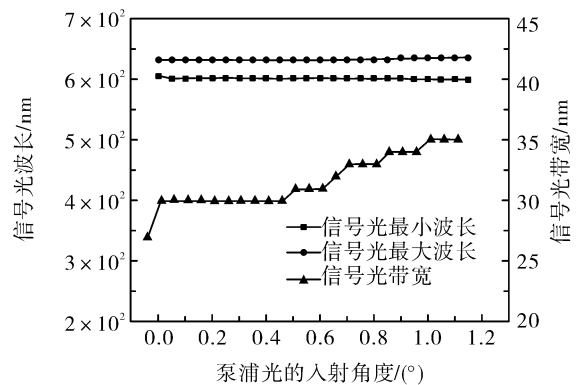
其中 $k_j = 2\pi n_j / \lambda_j$ ($j = p, s, i$), 将 $\Delta k = 2.783/L$ 代入(10)式可得:

$$(k_s + k_i) \cos \alpha + k \cos \theta - k_{p1} \cos \psi \leq 2.783/L \quad (11)$$

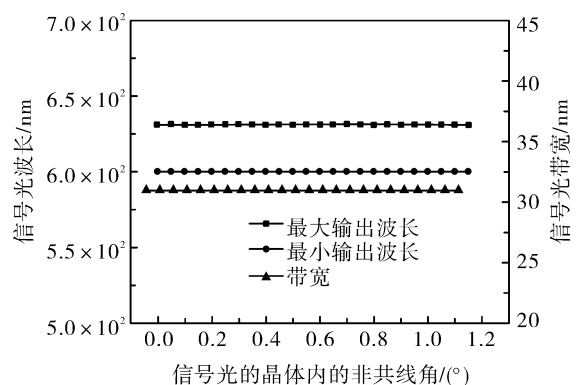
为了保证泵浦光和相关光都能够在晶体的后端面输出, 按照晶体尺寸限制 (ψ, α) 的角度范围为 $-1.15^\circ \sim 1.15^\circ$, 利用(11)式可知, 信号光波长 λ_s 随着 (ψ, α, θ) 的变化, 在泵浦光的入射角度范围内以(11)式为循环算法条件, θ 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内, 循环找到最大的波长和最小的波长, 两者之差作为信号光波长的范围, 其信号光范围可由下式表示:

$$\Delta\lambda_s = \max(\lambda_s) - \min(\lambda_s) \quad (12)$$

(11)式变量太多, 循环程序较复杂, 可以采用先控制一个变量, 观察其中一个变量与其他的变量的关系。图 3 表示相关光子信号光通道的范围与泵浦光的入射角、信号光通道范围与其非共线的关系。



(a) $\alpha = 0^\circ$ 时, 信号光的输出范围与泵浦光的入射角度的关系



(b) $\psi = 0^\circ$ 时, 信号光的输出范围与晶体内的非共线角的关系

图 3 相关光子的信号波段的输出范围

Fig. 3 Bandwidth of signal channel

3 结论

由于参量下转换的光子转换效率低,输出信号信噪比小。采用短波激光器泵浦 PPLN 周期性晶体,可获得较大功率的参量光。分析了泵浦光在 PPLN 晶体端面的入射角对参量光的转换效率、空间分布、参量带宽及晶体周期的影响,并进行了数值模拟。分析发现当泵浦光正入射晶体端面时,参量光功率转换大,带宽小,发散角大;随着入射角度的增大,转换效率降低,带宽变小,发散角变小且空间分布会发生相对偏移。本文研究结果可为相关光子探测、探测器量子效率的高精度定标提供理论依据。为了验证本文理论模型的正确性,下一步将搭建实验装置进行光谱测量。

参考文献:

- [1] Klyshko D N. Use of two-photon light for absolute calibration of photoelectric detectors [J]. Sov. J. Quantum Electron, 1980, 10(9): 1112-1116.
- [2] Brida G, Castelletto S, Novero C, et al. Quantum-efficiency measurements of photodetectors by means of correlated photons[J]. J. Opt. Soc. Am. B, 1999, 16: 1623-1627.
- [3] Odate S, Yoshizawa A, Fukuda D, et al. Quantum efficiency measurements by bidirectional coincidence counting of correlated photon pairs[J]. Opt. Lett., 2007, 32(21): 3176-3178.
- [4] Lindenthal M, Kofler J. Measuring the absolute photodetection efficiency using photon number correlation [J]. Appl. Opt., 2006, 45(24): 6059-6064.
- [5] Brida G, Demonstrate I P. Detection of multimode spatial correlation in PDC and application to the absolute calibration of a CCD camera[J]. Opt. Express, 2010, 18(20): 20572-20584.
- [6] Michael L, Johannes K. Measuring the absolute photodetection efficiency using photon number correlations [J]. Appl. Opt., 2006, 45 (24): 6059-6064.
- [7] Brida G, Chekhova M, Genovese M, et al. Absolute calibration of analog detectors by using parametric down conversion, Instrumentation and Measurement [J]. IEEE Transactions, 2007, 56 (2): 275-279.
- [8] Brida G, Genovese M. Possibility of absolute calibration of analog detectors by using parametric down-conversion: a systematic study[J]. J. Opt. Soc. Am. B, 2006, 23(10): 2185-2193.
- [9] Yoshino K, Aoki T, Furusawa A. Generation of continuous-wave broadband entangled beams using periodically poled lithium niobate waveguides [J]. Applied Physics Letters, 2007, 90: 041111-1-041111-3.
- [10] Oc-Yeub Jeon, Min-Ji Jin, Hwan-Hong Lim, et al. Broadband optical parametric generation in the telecommunication band and simultaneous RGB generation by quasi-phase-matched parametric conversion process[J]. Physical Society, 2006, 49: 589-591.
- [11] Shashi P, Salla G R, Aadhi A, et al. Spatial distribution of spontaneous parametric down-converted photons for higher order optical vortices[J]. Optics Communications, 2014, 326: 64-69.
- [12] Haidar S, Usami T, Shikata J. Seed-source tuning of a broadband noncollinear optical parametric generator based on periodically poled LiNbO₃ [J]. Opt. Eng., 2003, 42(1): 143-147.
- [13] Chen Dong, Liu Wenqing, Zhang yujun. Tuning characteristic of PPLN based difference-frequency-generation laser system [J]. Acta. Optica. Sinica, 2009, 29(3): 761-766.
陈东,刘文清,张玉钧. PPLN 晶体差频中红外激光系统调谐特性研究 [J]. 光学学报, 2009, 29 (3), 761-766.
- [14] Jundt D. Temperature-dependent sellmeier equation for the index of refraction, n_e , in congruent lithium niobate[J]. Opt. Lett., 1997, 22(20): 1553-1555.
- [15] Martin M F, Magel G A, Dieter H, et al. quasi-phase-matched harmonic generation: tuning and tolerances [J]. IEEE J. Quantum Electron, 1992, 28 (11): 2631-2654.