#### 文章编号: 1674-8085(2020)01-0005-05

# 基于波段可调关联光子源的量子效率测量系统研究

# 李健亮,齐冬丽,王 赫,\*冯 瑜

(沈阳理工大学理学院,辽宁,沈阳 110159)

**摘 要:**随着单光子探测器应用领域的拓展,其覆盖波段不断增加,为满足不同波段探测器量子效率定标的需求, 研究基于波段可调关联光子源的量子效率测量系统意义重大。设计了角度相位匹配的波段可调关联光子源,计算 了多波段晶体的相位匹配曲线,搭建了光源系统及符合测量平台。测量了参考通道和符合通道的光子数,分析实 验数据,完成了信号光通道探测器量子效率的测量。单光子探测器在1550 nm 波段的量子效率为 9.42%,与出厂 数据在相应波长处量子效率偏差为 0.58%,验证了方法的可行性,为进一步发展高精度的多波段量子效率测量系 统奠定了基础。

 关键词:关联光子源;波段可调;角度相位匹配;量子效率

 中图分类号:O437
 文献标识码:A

 DOI:10.3969/j.issn.1674-8085.2020.01.002

# **RESEARCH ON QUANTUM EFFICIENCY CALIBRATION SYSTEM BASED ON BAND-TUNABLE CORRELATED PHOTON SOURCE**

LI Jian-liang, QI Dong-li, WANG He, \*FENG Yu (Shenyang Ligong University, Shenyang, Liaoning 110159, China)

**Abstract:** With the expansion of single-photon detectors, the increasing coverage band, and the need to meet the quantum efficiency calibration of different band detectors, it is of great significance to study the quantum efficiency measurement system of band-tunable correlated photon sources. We design an angular phase-matched band-tunable correlated photon source, calculate the phase matching curve of the crystal, and build a light source system and a measurement platform. The reference channel and the number of photons matching the channel are measured, and the measurement of the quantum efficiency of the signal light channel detector is completed. The quantum efficiency of the single photon detector in the 1550 nm band is 9.42%, and the quantum efficiency deviation from the factory data at the corresponding wavelength is 0.58%. This proves the feasibility of the method and lays a foundation for further development of high-precision multi-band quantum efficiency measurement system.

(Spontaneous Parametric Down Conversion, 简称

SPDC)是指单色泵浦光与非线性介质相互作用生成成对光子的过程。SPDC 过程产生的光子对具有

Key words: correlated photon source; band adjustable; phase matching angle; quantum efficiency

## 0 引言

基于二阶非线性效应的自发参量下转换技术

收稿日期: 2019-10-23; 修改日期: 2019-12-03

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目(20170540783)

作者简介:李健亮(1995-),男,辽宁沈阳人,硕士生,主要从事激光器件与光电探测技术研究(E-mail:14704065264@qq.com);

齐东丽(1978-),男,辽宁沈阳人,讲师,博士,主要从事光谱研究(E-mail:285385997@qq.com);

王 赫(1997-),男,吉林吉林人,硕士生,主要从事激光器件与光电探测技术研究(E-mail:285912110@qq.com);

<sup>\*</sup>冯 瑜(1977-),男,辽宁抚顺人,副教授,博士,主要从事量子通信与量子计量研究(E-mail:fyudxxmsn@hotmail.com).

纠缠纯度高、检测方便、相干性距离长等特性,因此也被称为"关联光子对"。

1967 年, Cornell 大学的 Magde 等人<sup>[1]</sup>在实验 中利用晶体首次观察到 SPCD 现象,这个发现当时 并没有得到重视。直到 1987 年, Hong 等人<sup>[2]</sup>的实 验使人们开始觉得利用晶体的二阶非线性效应是 制备纠缠源的有效方法。之后的几十年里,人们对 晶体的特性和应用做了大量的研究工作。Friberg 在 1984年于实验中发现利用 SPCD 方法产生的纠缠光 子对的时间间隔小于100ps<sup>[3]</sup>;在这之后,英国物理 实验室、法国的皇家实验室、国际联合实验室等<sup>[4]</sup> 研究小组都在研究单波段的光电探测器量子效率 的定标精度。2011年,Fabian等人<sup>[5]</sup>利用两个周期 极化磷酸氧钛钾(PPKTP)晶体获得了 640 k/s/mw 的光子对产生速率。与 EPR 态相比, 纠缠态产生光 子对的精确度达到了 0.98。2013 年, 安徽光机所李 平付等人<sup>[6]</sup>,利用 355 nm 激光器泵浦偏硼酸钡 (BBO) 晶体产生了波段可调的相关光子,相关光 子测量的光谱范围为 633~790 nm。2015 年,中科 院安徽光机所高东阳等人<sup>[7]</sup>,利用 355 nm 连续激光 器泵浦非线性 BBO 晶体,制备和测量了连续宽波 段的相关光子对,测量的相关光子光谱范围为 450~700 nm。目前红外波段在量子通信、军事对抗、 光纤通信等领域应用十分广泛,因此对于红外波段 单光子探测器在可调波段连续定标具有重要意义。

本文设计了基于 BBO 晶体自发参量下转换效 应的关联光子源,利用 355 nm 连续激光器泵浦非 线性晶体实现了关联光子源的波段可调。通过搭建 的符合测量实验系统,测量了参考通道及符合通道 的光子数,分析实验数据,完成了单光子探测器量 子效率的测量。

### 1 基本原理

#### 1.1 相位匹配

自发参量下转换是倍频的逆过程,一般情况 下,参与相互作用的三个光波频率是一定的。由非 线性光学效应可知,一个泵浦光子入射到晶体中心 后,会有一定的概率自发地成为两个低频的光子, 该过程满足能量守恒和动量守恒定律<sup>[8]</sup>,即

$$\omega_p = \omega_i + \omega_s$$

$$k_p = k_i + k_s$$
(1)

其中, ω、k 分别表示频率和波矢, 下标 p、s、i 分别代表泵浦光子、信号光子和闲频光子。晶体非 线性参量下转换示意图如图1所示。



图 1 晶体非线性参量下转换示意图 Fig.1 Schematic diagram of crystal nonlinear parametric down conversion

当泵浦光频率 ω<sub>p</sub> 固定后,为了产生指定的一 对输出频率 ω<sub>s</sub> 和 ω<sub>t</sub>(满足 ω<sub>p</sub>=ω<sub>s</sub>+ω<sub>i</sub>),需要找到适 当的相位匹配角,使相位匹配条件成立。相位匹配 角是指在晶体中入射激光相对于晶体光轴方向的 夹角,而不是与入射面法线的夹角。

激光以一定角度入射晶体,通过晶体的双折 射,由折射率的变化来补偿正常色散而实现相位匹 配的,这称为角度相位匹配<sup>[9]</sup>。角度相位匹配又可 分为两类。第一类是入射同一种线偏振光,负单轴 晶体将两个 e 光光子转变为一个 o 光光子。第二类 是入射光中同时含有 o 光和 e 光两种线偏振光,负 单轴晶体将两个不同的光子变为 e 光光子,正单轴 晶体变为一个 o 光光子。单轴晶体的相位匹配条件 见表 1。

Table 1 Phase matching conditions of uniaxial crystal									
晶体种类	第一	类相位匹配	第二类相位匹配						
	偏振性质	相位匹配条件	偏振性质	相位匹配条件					
正单轴	e+e→0	$n_e^{\omega}(\theta_m) = n_o^{2\omega}$	o+e→0	$\frac{1}{2}[n_o^{\omega}+n_e^{\omega}(\theta_m)]=n_o^{2\omega}$					
负单轴 o+o→e		$n_e^{\omega}=n_o^{2\omega}(\theta_m)$	e+o→0	$\frac{1}{2}[n_e^{\omega}+n_o^{\omega}(\theta_m)]=n_e^{2\omega}$					

表1 单轴晶体的相位匹配条件

#### 1.2 BBO 晶体的角度调谐

BBO 晶体为负单轴晶体,采用 I 类相位匹配方 式,要求泵浦光为 e 光,信号光和空闲光则均为 o 光。在 BBO 晶体中,折射率与波长有关的色散方 程(Selleimer 方程)<sup>[10]</sup>为:

$$n_o = \sqrt{2.7359 + \frac{0.01878}{\lambda^2 - 0.01822} - 0.01354\lambda^2}$$
(2)

$$n_e = \sqrt{2.7359 + \frac{0.01224}{\lambda^2 - 0.01667} - 0.01516\lambda^2}$$
(3)

其中, λ 为光波波长, 单位是 μm。基于 BBO 晶体 的色散方程在波长在 0.4~3.1 μm, 温度在 20~400 ℃ 时适用。信号光作为 o 光, 代入公式 (2) 中, 通 过 Matlab 作图, 则它的折射率与波长的关系如图 2 所示。



图 2 BBO 晶体折射率与信号光波长的色散曲线 Fig.2 Dispersion curve of BBO crystal refractive index and signal light wavelength

因为在参量下转换过程中需要满足能量守恒,则有:

$$\frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_i}$$
(4)

选取了几个常见的通信波长作为实验,这几个 波长分别是 710 nm,810 nm,1310 nm,1550 nm。

取决于实验室相关条件,我们所用的泵浦光为 355 nm 的紫外光,再根据(4)式可得空闲光λ<sub>i</sub>的 波长分别是 460 nm,487 nm,634 nm,710 nm。再 由 BBO 晶体的色散方程分别计算出泵浦光 e 偏振 光的折射率以及信号光子和空闲光子的 o 光、e 光 折射率。详细参数见表 2。

表 2 BBO 晶体对应泵浦光及不同信号光波长的折射率 Table 2 BBO crystals correspond to pump light and refractive index of different signal light wavelengths

	0 0	U
$\lambda$ /mm	n <sub>o</sub>	n <sub>e</sub>
355	1.7054	1.5770
710	1.6636	1.5469
810	1.6603	1.5442
1310	1.6504	1.5351
1550	1.6466	1.5310

在 SPDC 下 I 类相位匹配方式下,满足相位匹 配条件写成波长的表达式为:

$$\frac{n_e^p}{\lambda_p} = \frac{n_o^i}{\lambda_i} \cos \theta_i + \frac{n_o^s}{\lambda_s} \cos \theta_s$$

$$\frac{n_o^i}{\lambda_i} \sin \theta_i = \frac{n_o^s}{\lambda_s} \sin \theta_s$$
(5)

式中, $\theta_s$ 为信号光波矢与泵浦光的夹角, $\theta_i$ 为空闲 光波矢与泵浦光的夹角。且根据福建福晶科技股份 有限公司提供的 BBO 晶体资料,在晶体内部,信 号光子和空闲光子的辐射角度之和为 10°,即:  $\theta_i + \theta_s = 10°$ 。晶体中 e 光的折射率随波矢的方向 而定:

$$n_{e}(\theta) = \left(\frac{n_{o}^{2}n_{e}^{2}}{n_{o}^{2}\sin^{2}\theta + n_{e}^{2}\cos^{2}\theta}\right)^{1/2}$$
(6)

式中 *θ* 为晶体内泵浦光波矢方向与晶体光轴的夹 角,即相位匹配角。

Table 3 Phase matching angles of associated photon pairs and corresponding $\theta_i$ and $\theta_s$											
关联光子波长	460nm	1550nm	487nm	1310nm	632nm	810nm	710nm	710nm			
(°)	2.24	7.76	2.67	7.33	4.37	5.63	5.00	5.00			
相位匹配角	27	.49°	29	.69°	34.	95°	33.2	22°			

表 3 关联光子对的相位匹配角及对应

将常见的用于通信的参量光看作信号光,与之 相对应的参量光看作空闲光,将表2中的数据代入 到式(5)、式(6)中,可以解得几组纠缠光子对 的相位匹配角和信号光与闲频光所对应的角,详见 表 3。

随着 355 nm 泵浦光入射角的改变,即相位匹 配角的改变,可以得到几种不同的参量光波长的组 合,拟合曲线如图 3 所示。



Fig.3 Relationship between output wavelength and phase matching angle

## 2 实验系统

本文设计了基于 BBO 晶体制备波段可调的关 联光子源系统方案,如图 4 所示:



图 4 基丁 BBO 丽体祠奋波权可调的天联兀丁源系统 实验装置图

Fig.4 Experimental device diagram of correlated photon source system with adjustable band based on BBO crystal

由于 355 nm 紫外激光器体积小,输出功率高, 稳定性好,操作起来比较方便,对泵浦晶体时可通 过晶体的角度调谐特性得到可调谐的波段光输出, 可以拓宽输出光的波段范围。综合以上几点,最终 选择 355 nm 紫外激光器作为实验的泵浦源。

我们自主设计的光学电控平台,可以通过程序 控制选择不同的晶体,来实现波段可调关联光子源 的制备。电控平台界面设计了角度微调,是因为在 程序控制转换晶体时会发生一些微小的震动,所以要 通过角度微调旋转一定角度,来实现相位角的匹配, 进而实现波段可调关联光子源的制备。如图 5 为选择 制备 1550 nm 信号光时的电控平台主界面。

見体洪辺	z		光学电热	空平台	- •
晶体	信号光	闲频光	相位匹配角		
1	1550	460	27.49	•	角度微调
2	1310	487	29.69		1000000
3	810	632	34.95		正向反向
4	710	710	33.22		0.01*

图 5 制备 1550 nm 信号光的电控平台主界面 Fig.5 The main interface of the electronic control platform for preparing 1550 nm signal light

355 nm 激光器作为泵浦光经过光阑、长焦透镜 聚焦入射到电控平台上的 BBO 晶体上,得到信号 光和空闲光。在非线性晶体后面放置一个二向色 镜,是为了消除后续光路中泵浦光的影响。为了减 少泵浦光在两面镜子之间来回反射造成背景噪声 的增加,需要将二向色镜 45°放置。再经二向色镜 将信号光与闲频光分开,两路光分别经透镜被单光 子探测器接收。

两个探测器输出的脉冲信号都要经甄别放大器(ORTEC Model 583B)进行甄别。从闲频光通道输出的信号分别输入到计数器 A 中计数和输入到时间-幅度转换器(TAC)作为 START 输入端的触发脉冲信号;信号光通道输出的信号经延时器延时后输入到 TAC 作为 STOP 输入端的触发脉冲信号。TAC 将两路通道的脉冲时间差转化为脉冲信号经单道分析仪(SCA)筛选后,输入到计数器 2 计数就可以得到两路通道的符合计数值<sup>[11]</sup>。

# 3 结果与分析

我们在前期的实验中获取了不同的计数时间 下的多组实验数据,发现数据测量结果的精度并没 有随着计数时间的延长而得到明显改善,但是考虑 到计数时间较短时,计数值过小,不利于观测结果, 因此选择计数时间为 60 s 时的数据作为研究对象。 我们选取了一组典型通道的计数值,参考光通道计 数值和符合计数值见表 4,通过 Oringn 作图,如图 6 所示。

表4 参考通道计数值和符合通道计数值

Table 4 Reference channel count value and channel count value

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
参考(cps)	3890	3870	3843	3823	3892	3881	3820	3842	3891	3933
符合 (cps)	336	321	362	351	334	328	336	380	302	355



count value

消除单通道和符合通道的背景计数值,求出每 一次测量的量子效率,最后对所有的量子效率计算 结果求平均值,得到1550 nm 通道单光子探测器的 量子效率为9.42%,而厂家提供的单光子探测器在 1550 nm 处量子效率为10%。实验结果与探测器厂 家提供的数据具有较好的一致性。其中,数据存在 一定误差的原因,可能是在实验过程中,实验室的 杂散光、透镜和滤光片的透光率以及计数系统的计 数偏差等造成误差。因此,下一步的工作是需要通 过进一步改进实验装置,减少误差,完成基于 BBO 晶体制备波段可调的关联光子源。

## 6 结论

本文介绍了参量下转换产生关联光子的基本 原理,从理论上计算了 SPDC 过程变换不同晶体相 位匹配角,产生了波段可调的关联光子源。并将实 验结果与探测器厂家提供的数据进行比较,实验结 果与探测器厂家提供的数据具有较好的一致性。该 项研究表明,SPDC 过程变换相位匹配角可以制备 波段可调的关联光子源,这就为下一步研发基于关 联光子的波段可调定标技术提供了必要的理论指 导和实验依据,有望在光学计量领域获得新的应 用。  Magde D, Mahr H. Study in ammonium dihydrogen phosphate of spontaneous parametric interaction tunable from 4400 to 16000Å[J]. Physical Review Letters, 1967, 18(21): 905-907.

- [2] Hong C K, Ou Z Y, Mandel L. Measurement of subpico second time intervals between two photons by interference[J]. Physical Review Letters, 1987, 59(18): 2044-2046.
- [3] Friberg S, Hong C K, Mandel L. Measurement of time delays in the parametric production of photon pairs[J]. Physical Review Letters, 1985, 54(18): 2011-2013.
- [4] 高冬阳,李健军,夏茂鹏,等. 多波段相关光子光谱分布 与时间相关性测量实验研究[J].光谱学与光谱分 析.2016(5):1300-1307.
- [5] Wu L A, Chen X H, Zhai Y H, et al. Absolute self-calibration of single-photon detec- tors with cw and pulsed spontaneous paramet- ric down-conversion [J]. Proc. SPIE, 2006, 6305: 630505-7.
- [6] Li P F, Li J J, Xia M P, et al. Nu-merical simulationand experiment of spectral dis-tribution of type- I noncollinear spontaneous parametric down-conversion [J]. Journal of At- mosheric and Environmental Optics, 2013, 8(3): 1-9(in Chinese).
- [7] 李平付,李健军,夏茂鹏,等. I类非共线SPDC光谱分布数
   值模拟及实验研究[J]. 大气与环境光学学报,2013,8(3):
   1-9.
- [8] 高东阳. 波段可调参量下转换的相关光子速率分布测量[J]. 大气与环境光学学报.2015, 10(6): 1673-6141.
- [9] 蓝信锯. 激光技术[M].3版.北京:科学出版社,2009: 254-264.
- [10] 盛文阳,李健军,夏茂鹏,等. 基于参量下转换的3.39 μm
   中红外辐射源定标实验[J].红外与激光工程.2016(10):
   32-38.
- [11] 高冬阳,郑小兵. 基于连续和脉冲激光泵浦的相关光子 实验比对[J].光子学报.2019(6): 106-113.
- [12] 张洋洋,李健亮,冯志勇,等. 基于PPLN晶体的单光子探测器定标研究[J].井冈山大学学报:自然科学版.
   2018,39(6): 14-20.

# 9

#### 参考文献: