

引用格式: QIAN Yuan-dong, XIA Mao-peng, LI Jian-jun, *et al.* Effect of Temperature on the Output Angle and Conversion Efficiency of Parametric Down Conversion[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(10):1019001

钱远东,夏茂鹏,李健军,等. 温度对参量下转换输出角度和转换效率的影响[J]. 光子学报, 2020, 49(10):1019001

温度对参量下转换输出角度和转换效率的影响

钱远东^{1,2}, 夏茂鹏¹, 李健军¹, 翟文超¹, 徐明明¹

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所 通用光学定标与表征技术重点实验室, 合肥 230031)

(2 中国科学技术大学, 合肥 230026)

摘要:研究了BBO非线性晶体温度变化对自发参量下转换相关光子输出角度和转换效率的影响, 以此获取BBO非线性晶体适宜的工作温度, 从而降低温度对系统长期稳定性的影响. 根据实验需求设计晶体夹持和温控系统, 通过ANSYS热分析保证系统的可行性和可靠性. 之后改变晶体加热温度, 在温控精度不低于 $\pm 0.03^\circ\text{C}$ 条件下测量相关光子输出角度和不同光束质量下光子数率随温度变化曲线. 结果表明随着晶体温度的升高, 相关光子输出角度随温度增加呈正比例减小趋势, 该结果与理论计算结果相符. 同时晶体从 25°C 升温至 55°C 可提高较差光束质量光子数率约34%, 55°C 以后, 温度增长在较小比例提高光子数率的同时会极大的提高测量的背景噪声. 综合可知, BBO晶体在工作过程中使用温度以 55°C 为宜.

关键词: BBO晶体; 自发参量下转换; ANSYS热分析; 输出角度; 光子数率; 温度

中图分类号: O437

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204910.1019001

Effect of Temperature on the Output Angle and Conversion Efficiency of Parametric Down Conversion

QIAN Yuan-dong^{1,2}, XIA Mao-peng¹, LI Jian-jun¹, ZHAI Wen-chao¹, XU Ming-ming¹

(1 *Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optical and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China*)

(2 *University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

Abstract: The effect of temperature change of BBO nonlinear crystal on the photon output angle and conversion efficiency of spontaneous parametric down-conversion is studied, so as to obtain the appropriate operating temperature of BBO nonlinear crystal and reduce the influence of temperature on the long-term stability of the system. The crystal clamping and temperature control system is designed according to the experimental requirements, and the feasibility and reliability of the system are guaranteed by ANSYS thermal analysis. After that, by changing the crystal heating temperature, the relevant photon output angle and the change curve of photon number rate with temperature under different beam masses were measured under the temperature control accuracy of no less than $\pm 0.03^\circ\text{C}$. The results show that with the increase of crystal temperature, the output angle of relevant photon decreases proportionally with the change of temperature, which is consistent with the theoretical calculation results. Meanwhile, the increase of BBO crystal temperature from 25°C to 55°C can increase the photon rate of poor beam quality by about 34%, and the subsequent temperature increase in a small range will greatly increase the background noise of

基金项目: 国家自然科学基金(No.41805019), 国家重点研发计划(No.2018YFB05046), 国防技术基础(No.JSJL2018210C003)

第一作者: 钱远东(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高精度光学遥感器辐射定标技术. Email: eastqian@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 夏茂鹏(1987-), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为高精度光学遥感器辐射定标技术. Email: mpxia@aiofm.ac.cn

导师: 李健军(1978-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为高精度光学遥感器辐射定标技术. Email: jjli@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2020-06-23; 录用日期: 2020-08-15

<http://www.photon.ac.cn>

measurement while increasing the photon rate. Based on the comprehensive results, it can be seen that the temperature used by BBO crystal in the working process should be 55°C.

Key words: BBO Crystal; Spontaneous parametric down conversion; ANSYS thermal analysis; Output angle; Photon rate; Temperature

OCIS Codes: 190.4223; 230.5160; 000.2190; 300.6420

0 引言

基于参量下转换的辐射基准源的定标方法是以光子数率的方式来绝对表征传统意义的辐射功率,从而实现光功率统一溯源至普朗克常数,符合国际上量子辐射基准的发展方向.因此在辐射定标领域具有极好的应用前景.目前利用参量下转换的定标方法最高测量不确定度优于0.18%,与目前国际上公认的低温绝对辐射计定标的最高精度值进行比较,证明了该技术的合理性和有效性^[1].

参量下转换最先由 LOUISELL W H 于 1961 年在理论上完成预言^[2].当泵浦光束入射非线性晶体后,会以一定概率自发的分裂成两个光子,也称为相关光子.它们具有波长、空间、时间和偏振的相关性^[3],直至 1967 年, MAGDE D 等首次从实验上观察到参量下转换现象^[4].至今发展的几十年里,各国科学家通过不断的探索,针对不同非线性晶体的转换过程的研究均取得了长足的进步.目前对激光功率、非线性晶体长度、非线性系数对参量下转换的转换效率影响^[5],以及相关光子的输出角度与波长的对应关系^[6]、光谱光子数率曲线^[7]和宽光谱输出和宽光谱符合测量上面做了大量研究工作^[8-9],但均忽略了晶体所处的温度环境对上述结果的影响.

非线性晶体通常由无机盐构成,易受环境潮解,在使用过程中通常需要加热控制,使其长期处在干燥的环境中,延长其使用寿命.一般来说,非线性晶体的折射率与温度密切相关,其折射率是温度的函数.当晶体所处的温度场发生变化、泵浦光入射晶体后的热效应或者温度的不均匀性等因素,都会改变晶体折射率,破坏理想的相位匹配条件,改变相关光子的输出角度和降低转换效率^[10-13].

目前国内外众多学者对晶体在二次谐波过程中,因热特性对相位匹配条件的影响做了大量的研究.早在 20 世纪 70 年代 OKADA M 和 IEIRI S 发现,在产生二次谐波的非线性晶体中,由于吸收激光能量导致晶体温度的不均匀变化进而影响了相位匹配条件的变化^[14].2001 年,姚建铨从理论角度出发分析了 KTP 晶体的光吸收过程,以热传导方程为基础,对 KTP 晶体的热分布进行研究,计算了 KTP 晶体相位匹配角随温度的变化关系^[15].2014 年,于凯采用 Matlab 热传导模型分析了 BBO 晶体在不同束腰半径和激光功率下,温度产生的相位不匹配对晶体转换效率的影响^[16].2017 年,陈英提出在激光器变频过程中,采用具有相反热特性的非线性晶体对相位失调进行相互补偿,进而降低了温度偏差对转换效率的影响^[17].近年来,众多学者通过多种方法分析了多种非线性晶体因吸收激光能量导致温度的不均匀变化,进而导致相位匹配变化^[18-20].因此,对非线性晶体进行热特性研究是保障参量下转换过程长期正常运转的根本条件.然而,迄今鲜有对 BBO 非线性晶体加热过程中热特性的研究.

在相关光子辐射定标系统的研制过程中,为提高晶体工作环境并防止晶体表面的潮解,对晶体进行温度控制是必须的.为确定 BBO 非线性晶体在加热过程中最佳的工作温度以获得最佳转换效率和输出角度,本文采用理论分析和实验测量相结合的方式,研究了 BBO 非线性晶体温度变化对光子数率和输出角度的影响.首先根据实验需求设计实验所需的 BBO 非线性晶体夹持和温控系统,通过 ANSYS 热分析保证了系统的可靠性和可行性,之后通过实验测量出 25~75°C 温度条件下相关光子圆环半径并以此推算出各温度下相关光子输出角度,同时对不同质量激光器光子数率随温度的变化趋势进行了研究.

1 相关光子输出角度理论计算

自发参量下转换(Spontaneous Parametric Down Conversion, SPDC)是泵浦光入射非线性介质后产生参量混频的过程.该过程中每一个光子以一定概率自发地分裂为能量较低的两个光子,分别称为空闲光和信号光^[21],该过程满足动量守恒和能量守恒.

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i \quad (1)$$

$$k_p = k_s + k_i \quad (2)$$

式中, ω 和 k 分别表示频率和波矢, 下标 p, s, i 分别代表泵浦光子、信号光子和空闲光子. 式(1)和(2)也被称为相位匹配条件. 除满足相位匹配条件外, 泵浦光偏振方向也必须满足一定的要求, 对于 I 类 SPDC 过程 ($e \rightarrow o + o$), 泵浦光偏振方向须在晶体的主平面(晶体光轴与泵浦光矢量组成的平面)内才能产生相关光子. 在完全相位匹配条件下, 泵浦光矢量、信号光矢量和空闲光矢量在晶体内构成图 1(a)所示矢量三角形.

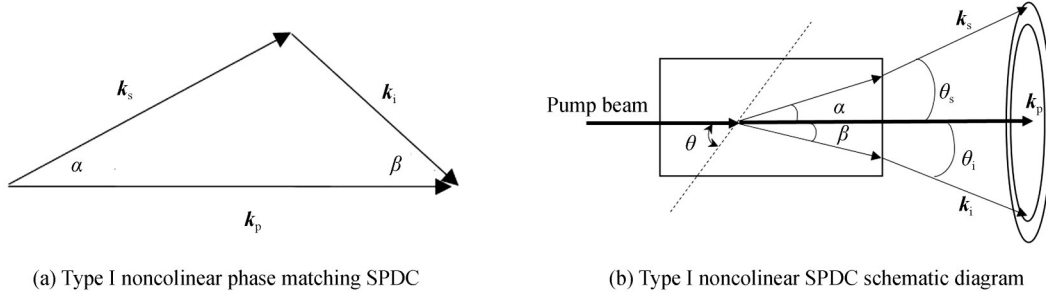


图 1 I 类非共线 SPDC

Fig.1 Type I noncolinear SPDC

图 1(b)为泵浦光泵浦非线性晶体后产生相关光子原理图, α 和 β 分别表示信号光和空闲光在晶体内的非共线角. θ_s 和 θ_i 分别表示两者在晶体外输出角度.

在图 1(a)中泵浦光波矢、信号光波矢和空闲光波矢构成一个矢量三角形. 根据三角形的余弦定理可知信号光的非共线角满足

$$\cos\alpha = \frac{k_p^2 + k_s^2 - k_i^2}{2k_p k_s} \quad (3)$$

式中, 泵浦光和偏振光波矢量均满足 $|k_j| = \frac{2n_j\pi}{\lambda_j}$ ($j = p, s, i$). 根据折射定律可得相关光子输出角度

$$\theta_s = \arcsin(n_s \cdot \sin\alpha) \quad (4)$$

式中, n_s 代表信号光子在晶体中的折射率. 在考虑温度变化的情况下, Sellmeier 方程可表示为^[22]

$$n_o = \left(2.7359 + \frac{0.01878}{\lambda_p^2 - 0.01822} - 0.01354 \cdot \lambda_p^2 \right)^{1/2} + \frac{dn_o}{dT} \cdot \Delta T \quad (5)$$

$$n_e = \left(2.3753 + \frac{0.01224}{\lambda_p^2 - 0.01667} - 0.01516 \cdot \lambda_p^2 \right)^{1/2} + \frac{dn_e}{dT} \cdot \Delta T \quad (6)$$

由于泵浦光为 e 光, 其折射率与相位匹配角有关, 相位匹配关系满足

$$n_p(\psi) = \frac{n_o \cdot n_e}{\sqrt{(n_e)^2 (\cos\psi)^2 + (n_o)^2 (\sin\psi)^2}} \quad (7)$$

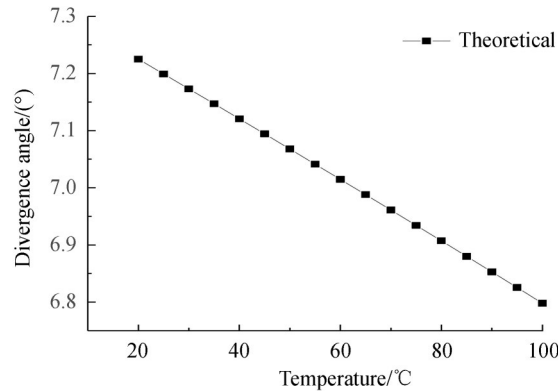


图 2 相关光子输出角度理论值

Fig.2 The output angle theoretical value

式中, ψ 为 BBO 晶体的相位匹配角. 联立式(3)~(7)可以计算出不同的温度条件下, 信号光输出角度随着温度的变化关系. 以 $\lambda_p=266$ nm 泵浦激光泵浦相位匹配角为 47.63° 的 BBO 晶体, 计算在 $25\sim 100^\circ\text{C}$ 范围内信号光 $\lambda_s=671$ nm 的相关光子的输出角度, 理论曲线如图 2 所示.

由图 2 可知, 信号光的输出角度与晶体温度有关, 随着温度的升高相关光子输出角度减小, 且输出角度与温度改变量成线性关系.

2 实验装置

2.1 晶体夹持系统

为保证 BBO 非线性晶体置于干燥环境, 以延长其使用寿命. 实验将 BBO 非线性晶体安装在自行研制的温控系统中, 如图 3 所示, 晶体在夹持过程中产生的应力集中, 易造成晶体破裂和改变晶体的光谱透过性, 导致光子损耗增大, 因此该系统的设计需考虑应力集中, 同时又要保证夹持系统内部整体良好的导热性, 以及减少温控部分同空气之间的换热进而保证温控精度.

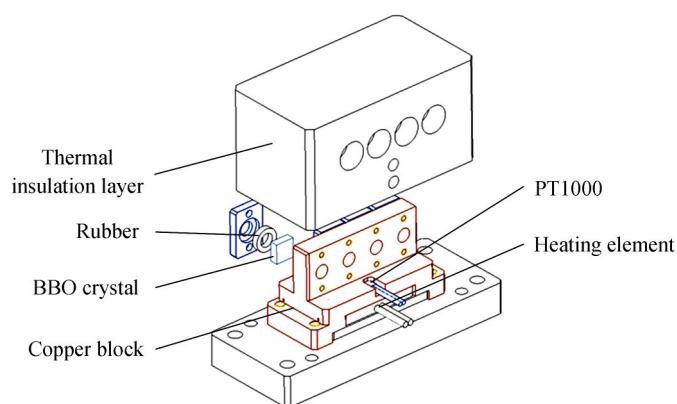


图 3 晶体夹持系统

Fig.3 Crystal clamping system

该设计采用机械夹持固定晶体, 为满足辐射定标系统波长和发散角要求, 需同时满足对多块晶体夹持固定, 每块晶体独立安装在开有凹槽的导热块中, 为保证加热过程中系统导热性良好, 导热块采用紫铜加工. 为防止晶体夹持时产生应力集中, 晶体夹持面采用软固定. 为减少加热系统同空气的接触以减小热对流进而提高温控精度, 设计使用黑色聚四氟乙烯制作保温外壳以保证加热系统同外界空气最小面积接触.

2.2 系统温度分析

为验证温控炉的保温性能和获取晶体的温度的均匀性数据, 采用 ANSYS 对其进行动态热力学分析, 为减小计算量, 对结构中的孔和倒角预先进行一定的简化, 环境温度设置为 20°C , 根据表 1 设置分析材料参数.

表 1 材料热分析参数表

Table 1 Material thermal analysis parameters table

Materials	Density/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	Thermal conductivity/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	Specific heat capacity/ $(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$
Copper	8 933	386.4	385
Aluminum	2 770	155	875
BBO Crystal	3 850	1.6	496
PTFE	950	0.28	2 300

系统热源为额定功率为 6 W 的陶瓷加热片, 尺寸为 $15\times 15\times 2$ mm³, 软件中设置加热片为内发热模式, 发热参数 $1.333\ 3\times 10^{-2}$ W/mm³, 设定传感器位置温度为目标温度.

系统的热量损失主要源于系统同空气之间的对流和热辐射, 因保温腔内和外壳表面空气流速不同, 分析时填充腔内空气, 并取腔内空气导热参数为 $5\ \text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 外壳表面同外界空气具有较强的对流作用, 设置

对流系数 $60 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. 最后设置保温外壳表面对外界的热辐射, 设置完成如图 4(a) 所示.

设置完成后开始动态热分析并显示温度分布云图如图 4(b) 所示, 在传感器位置温度设置为 55°C 条件时, 最侧面晶体中心处温度达到 55.013°C 和 55.011°C , 该处温度满足实验所需温度条件. 因实验过程仅测量单波段实验数据, 故实验仅需采用该处单块晶体进行测量.

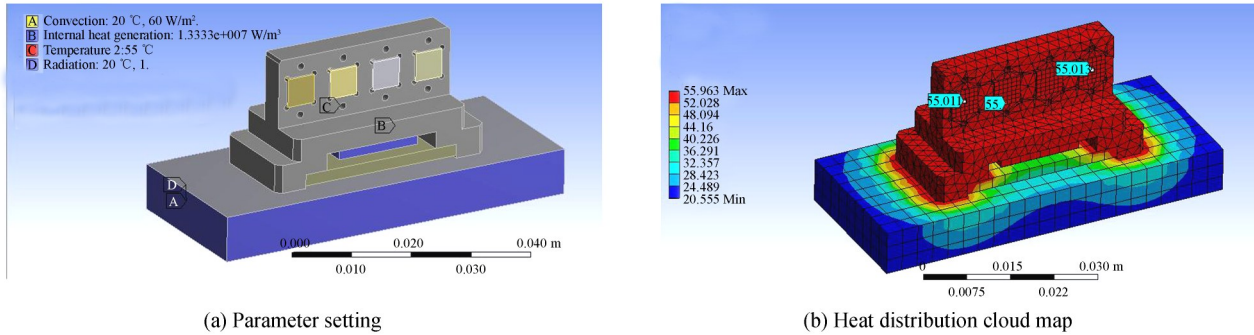


图 4 动态热分析
Fig.4 Dynamic thermal analysis

3 实验测试

3.1 相关光子输出角度测试光路

由于泵浦激光的发散角为毫弧度量级, 其对相关光子的输出角度的展宽可以忽略. 因此本实验采用了发散角较大的上光所激光器进行测试. 根据实验原理设计如图 5 所示实验光路, 自泵浦激光出射至入射 BBO 晶体为激光光束整形光路.

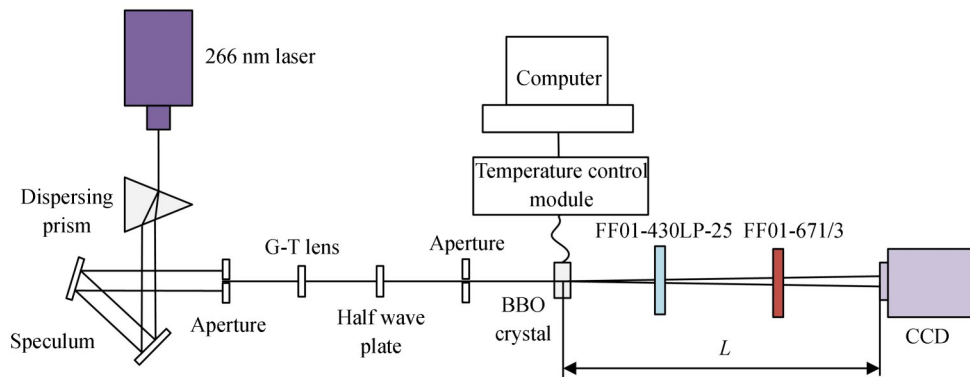


图 5 相关光子发散角测试实验光路原理图
Fig.5 Experimental optical path diagram

实验采用了 266 nm 连续单波长激光器作为泵浦光, 其最大输出功率为 50 mW , 入射晶体的光束功率为 8.7 mW . 泵浦光经顶角为 50° 的棱镜色散后, 依次通过两个 266 nm 高反射镜和小孔光阑后准直输出, 以滤除残留的 532 nm 泵浦光, 达到提高相关光子信号的探测器精度. 泵浦光束之后依次通过格兰泰勒棱镜和半波片后垂直入射 BBO 非线性晶体 (相位匹配角 47.63° , 尺寸 $5 \times 5 \times 2 \text{ mm}^3$). 经泵浦光与非线性晶体相互作用后产生相关光子. 光路设计中采用格兰泰勒棱镜对泵浦光进行起偏, 以提高消光比. 旋转半波片可改变泵浦光偏振方向, 用以 CMOS 背景扣除和测量光子数率背景噪声.

整形完成的泵浦光束经 BBO 晶体产生相关光子, 通过 430 nm 长通滤光片和 671 nm 窄带干涉滤光片后入射 CMOS 光敏面, 通过软件读取圆环图像.

为减小泵浦光在晶体前端面的反射, 晶体前端面镀有 266 nm 增透膜. 430 nm 滤光片和 671 nm 滤光片用于消除残留的 266 nm 泵浦光以及选择探测所需的相关光子的波段, 提高测量信噪比, 避免杂散光对测试结果的影响. 671 nm 通道的选择主要考虑相关光子输出圆环能够直接被 CMOS 光敏面接收, 且圆环半径较大,

便于测量出圆环参数随温度的微小变化量.实验时 CMOS 置于三维平移台,通过调整 CMOS 姿态使 266 nm 激光沿原路返回,以保证相关光子圆环正入射光敏面,防止测试过程中圆环扁平化,形成椭圆圆弧.

为保证温控系统的温控精度,在满足 $\pm 0.03^\circ\text{C}$ 温控精度的加热条件下,系统可用的温度调谐范围为 $20^\circ\text{C}\sim 75^\circ\text{C}$.实验中以 5°C 步长间隔进行测试,每次当晶体加热温度稳定后等待 10 min 进行测试,以实现晶体充分预热,在到达所需的测试温度和精度的条件下记录实验图像.

3.2 参量下转换产生的光子数率与温度的变化关系

由于参量下转换的转换效率与多种因素有关,包括:入射激光的光强、晶体长度、激光与晶体的耦合效率、激光的发散角、激光的入射角度和相位匹配角等.为了获取参量下转换转换效率与温度的唯一对应关系,并排除激光器自身的光束特性等因素对转换效率的影响,本实验计划采用两台不同光束质量的激光器进行实验,分别为具有较差光束质量的上光所激光器和光束质量较优的德国 Crylas 激光器,实验光路如图 6 所示.

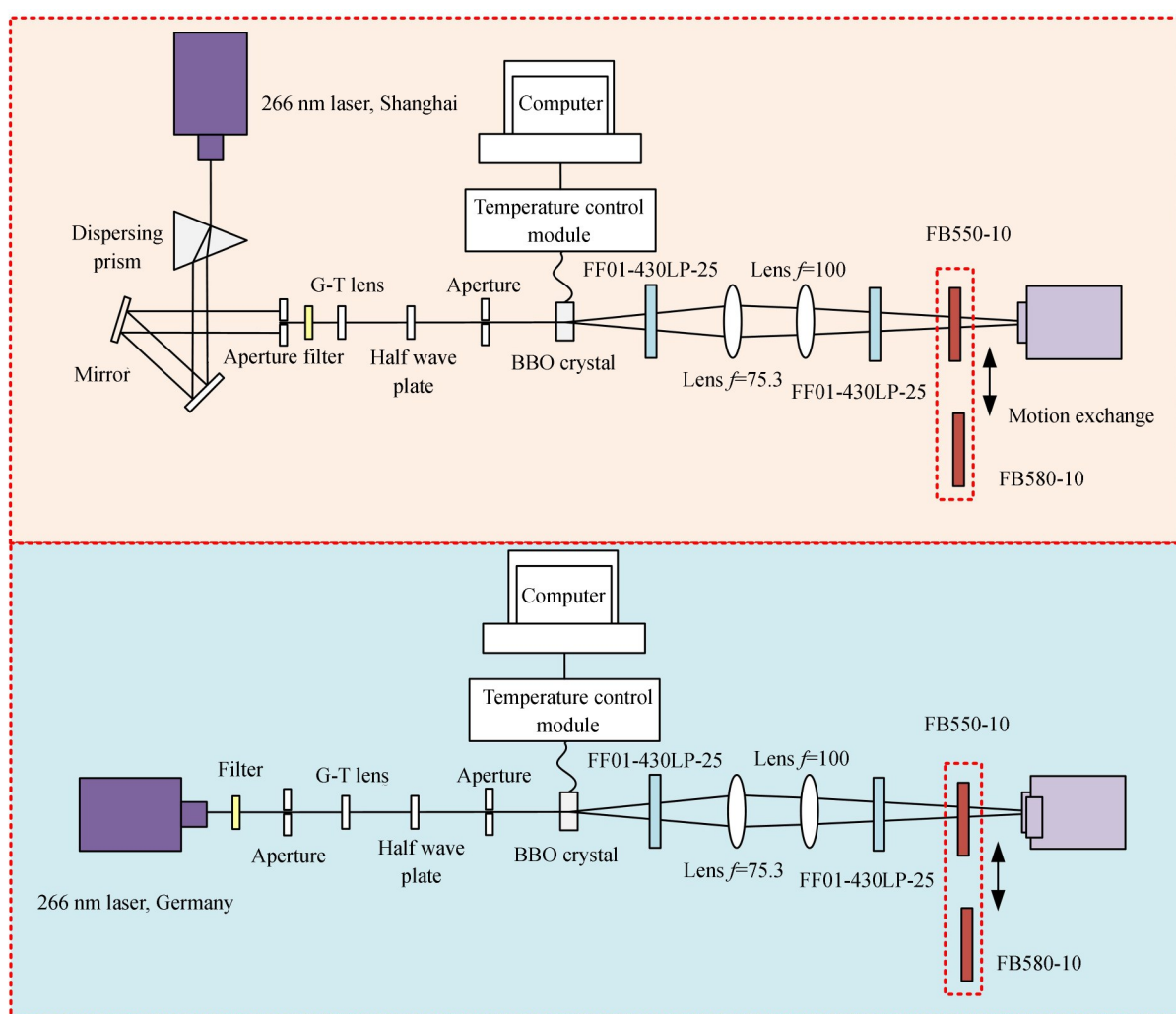


图6 光子数率测量光路
Fig.6 Optical path diagrams of the photon rate

影响光子数率测量的精度因素最主要有三点:1)泵浦光入射功率波动校正;2)耦合在相关光子中的残留泵浦光的抑制滤除;3)相关光子收集效率的控制.泵浦光波动对光子的数量的影响校正主要是通过入射晶体的激光出射功率进行监测归一化.残留泵浦光的滤除是影响光子数率探测精度最主要因素.目前对残留泵浦光滤除的手段包括:光谱分离、空间分离、材料吸收、偏振分离.目前应用最多的方法是光谱分离和空间分离.考虑实验装置的复杂性和调节难度,本实验采用光谱分离进行泵浦光的滤除.因上光所激光器输

出的泵浦光含 532 nm 的基频光,为了避免残留泵浦光对测试结果的影响,实验中对上光所激光器采用色散棱镜加滤光片组合的方式以滤除残留的 532 nm 泵浦光.

实验时为了保证产生的相关光子被光电倍增管(Photomultiplier Tube, PMT)完全接收,实验中采用 75.3 mm 和 100 mm 透镜组合将 550 nm/580 nm 相关光子进行准直和聚焦收集,保证相关光子圆环完整的被 PMT 光敏面接收.在实验中先采用 CMOS 相机测试光斑的最小位置和光斑直径,经过相机的像素尺寸进行换算后,其光斑直径约为 0.1 mm 左右,完全满足 $\Phi 5$ mm 的入射要求.考虑随着温度的变化改变了相关光子的输出角度从而影响了相关光子的耦合效率,通过 Zemax 模拟仿真可以发现,这种影响也可以忽略.长通滤光片和窄带滤光片主要作用是抑制残留泵浦光 and 选择所需的探测通道,两者组合能够消除绝大部分的残留泵浦光.剩余泵浦光通过旋转半波片的方式来测量获取,通过与信号相减以获取不同温度下的光子数率值.考虑到晶体的温度对晶体透过率的影响,不同温度下的背景都是在独立测量的,通过周期性的背景扣除来提高光子数率的测量精度.

4 实验结果

4.1 相关光子输出角度测试结果与分析

实验中相关光子圆环半径较大,微光相机光敏面仅能读取部分圆环图像,因此难以判断图像的圆度.为防止图像扁平化的影响,实验时在其他条件不变的情况下测量了微光相机在不同位置下相关光子圆环图像,微光相机圆环图像如图 7(a)所示.

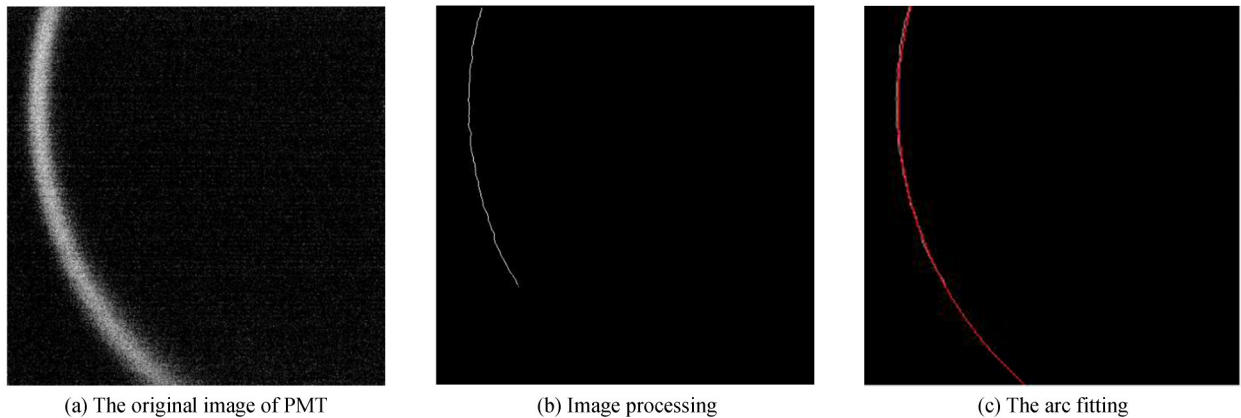


图 7 圆环图像处理

Fig.7 The ring image processing

因原始图像中圆环光晕较大,且存在大量噪声.为得到圆弧参数,后期采用计算机辅助处理.通过对原始图像进行滤波处理,在宽度方向上以圆环宽度的众数为基准,提取数值相差一定范围内的圆环中心,处理后得到的圆弧信息如图 7(b)所示.最后对处理得到的数据点采用最小二乘拟合,拟合圆弧曲线如图 7(c)所示.对 CMOS 相机不同位置下实验圆弧均采用上述方法进行处理,所得半径值均为 CMOS 图像像素个数,半径值按每个像素点为 1 mm 等比例放大,并将所得数据绘制成图 8 所示圆弧半径随温度变化折线图.

在温度 T 时,通过圆弧半径计算相关光输出角度为

$$\theta_T = \arctan\left(\frac{k \cdot R_T}{L}\right) \quad (8)$$

式中, k 为 PMT 图像放大系数, θ_T 和 R_T 为温度 T 时相关光子输出角度和圆弧半径的计算值, L 为晶体中泵浦光分裂为两个相关光子的位置至 PMT 光敏面之间的垂直距离,如图 5 所示.在实验过程中参数 L 值难以测量,已知 BBO 晶体 25°C 状态下相关光子输出角度为 7.22°,根据该温度下圆环半径值可推算出 k/L 参数值.由此可计算出不同温度下相关光子输出角度 θ_T , 所得结果如图 9 所示.

通过相关光子输出角度对温度的变化曲线可知,随着 BBO 晶体温度的升高,圆环的半径逐渐减小,相关光子输出角度总体呈减小趋势,该变化趋势符合理论计算结果.

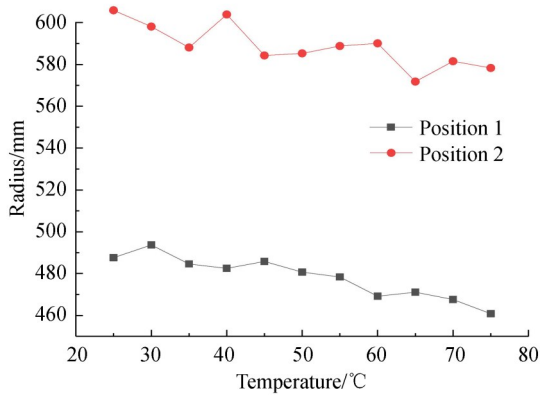


图8 温度对圆环半径影响

Fig.8 Temperature effect on the radius of the ring

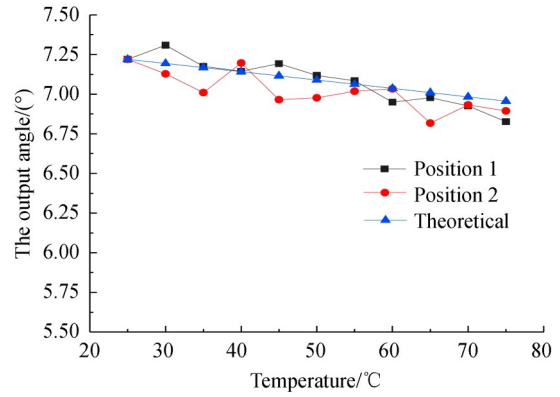
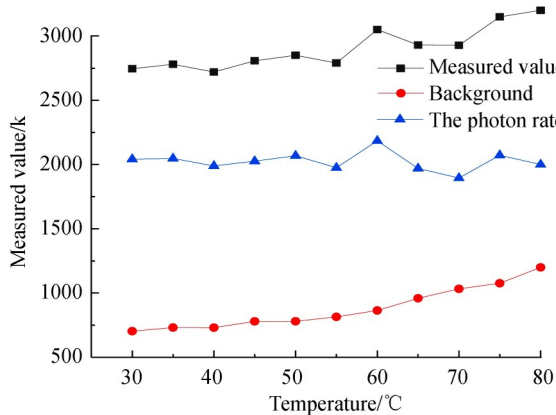


图9 温度对相关光子输出角度的影响

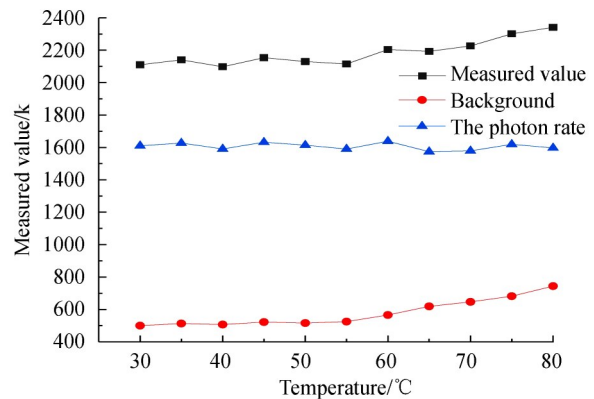
Fig.9 The effect of temperature on the output angle

4.2 光子数率实验测试

因上光所的激光功率波动性较大,因此测试光子数率过程中,不能忽略功率的变化对测试结果的影响.在实验中测试每一个温度点的光子数率前后分别用功率计测试激光器功率,以两者功率的平均值作为该温度下激光的入射功率.通过将各温度下的光子数率测量值减去对应温度下的背景噪声得到不同温度条件下光子数率值,再将光子数率值除以功率变化系数得到各温度下实际光子数率值,图10和图11分别列举了不



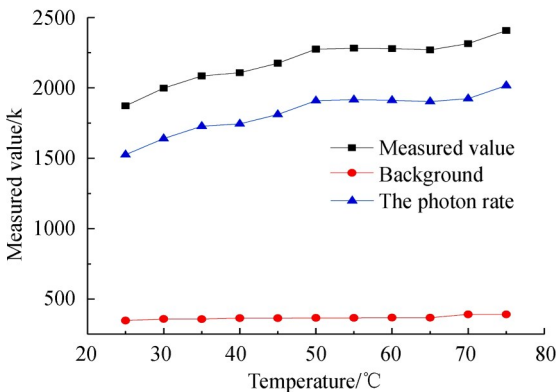
(a) 550 nm experiment data



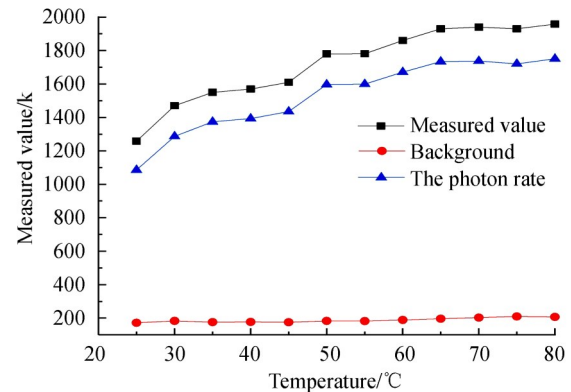
(b) 580 nm experiment data

图10 德国Crylas激光器光子数率与温度的关系

Fig10 Relationship between the photon rate and temperature in Crylas Laser, Germany



(a) 550 nm experiment data



(b) 580 nm experiment data

图11 上光所激光器光子数率与温度的变化关系

Fig11 Relationship between the photon rate and temperature in Shanghai Laser

同激光器在不同波段下实际光子数率值随温度的变化曲线。

从图 10 可知,德国 Crylas 激光器产生的光子数率对温度变化不敏感,随着温度变化实际光子数率缓慢震荡波动,从长期看基本呈水平线趋势,然而其背景计数随着温度在 55℃ 以后上升明显,基本成线性关系。从图 11 上光所激光器产生的光子数率可知,随 BBO 晶体温度的升高,光子数率在 25~50℃ 范围内光子数率呈增长趋势,之后随温度的增长光子数率变化相对平缓,且 55℃ 时光子数率相对于 25℃ 增长约为 34%。综合对比图 10 和图 11 发现,温度对转换效率的影响程度与光束质量有关,泵浦光的光束质量越好影响越小。因此从提高转换效率的角度出发,要考虑温度和光束质量、光束耦合等多种因素的相互影响,通过优化各个参数以实现最大的转换效率输出,这是本论文下一步研究工作。

5 结论

本文研究了温度对自发参量下转换过程中相关光子的输出角度和光子数率的影响。首先设计温度可控的 BBO 非线性晶体夹持系统,通过 ANSYS 动态热力学仿真证明了结构的可行性和可靠性。随后测量了不同温度下相关光子圆环图像和不同激光光束质量下光子数率随温度的变化曲线。实验结果表明,随着 BBO 晶体温度的升高,相关光子输出角度呈减小趋势,符合理论的计算结果。温度对参量下转换的转换效率的影响程度与泵浦光束质量有关,泵浦光的光束质量越好影响程度越小。通过综合对比各实验温度下相关光子输出角度和光子数率,发现 55℃ 为 BBO 晶体参量下转换的适宜工作温度点。该温度兼顾了在较优的光束质量下具有较低的背景噪声和在较差光束质量下转换效率较高,该结论对参量下转换的温控温度的选取具有一定普适性意义。本文研究为提高辐射定标系统的精度和稳定性具有参考价值。

参考文献

- [1] 盛文阳. 基于参量下转换的单光子源设计和性能测试[D]. 合肥:中国科学技术大学,2019.
- [2] LOUISELL W H, YARIV A, SIEGMAN A E. Quantum fluctuations and noise in parametric processes[J]. *Physical Review*, 1961, **124**(6): 1646-1654.
- [3] 翟畅. 基于周期性非线性晶体的光子对制备[D]. 合肥:中国科学技术大学,2010.
- [4] MAGDE D, MAHR H. Study in ammonium dihydrogen phosphate of spontaneous parametric interaction tunable from 4400 to 16000 Å[J]. *Physical Review Letters*, 1967, **18**(21): 905-907.
- [5] BRIDA G, GENOVESE M, NOVERO C. On the measurement of photon flux in parametric down-conversion[J]. *European Physical Journal D*, 2000, **8**(2): 273-275.
- [6] PENIN A N, SERGIENKO A V. Absolute standardless calibration of photodetectors based on quantum two-photon fields[J]. *Applied Optics*, 1991, **30**(25): 3582-3588.
- [7] BORSA G, CASTELLETTO S, GODONE A, et al. Measurement of second-order optical nonlinear coefficient from the absolute radiant power of parametric fluorescence in LiIO₃[J]. *Optical Review*, 1997, **4**(4): 484-489.
- [8] GAO Dong-yang, LI Jian-jun, HU You-bo, et al. Research on broadband spectrum distribution based on spontaneous parametric down conversion[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, **52**(5): 185-190.
高冬阳, 夏茂鹏, 胡友勃, 等. 基于自发参量下转换的宽光谱分布实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, **52**(5): 185-190.
- [9] HU You-bo, LI Jian-jun, GAO Dong-yang, et al. Measurement and correction of linearity of photon counters[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(6): 0604001.
胡友勃, 李健军, 高冬阳, 等. 光子计数器的线性测量和修正[J]. 光子学报, 2016, **45**(6): 0604001.
- [10] YANG Hou-wen, CHENG Wen-yong, WANG Jun-hua, et al. 355nm ultraviolet laser with angle phase mismatch compensated by temperature[J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2015, **26**(12): 2300-2306.
杨厚文, 程文雍, 王军华, 等. 温度补偿角度相位失配 355nm 紫外激光器[J]. 光电子·激光, 2015, **26**(12): 2300-2306.
- [11] HUANG Jin-zhe, WANG Hong, CHANG Yan-qin, et al. Simulation of the temperature-beam coupling in frequency doubling of BBO crystals[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(9): 6243-6249.
黄金哲, 王宏, 常彦琴, 等. BBO 晶体倍频中的温度场与光场耦合模拟[J]. 物理学报, 2010, **59**(9): 6243-6249.
- [12] LI Xiao-ming, SHEN Xue-ju, LIU Xun, et al. Study on temperature adaptability extension of KTP frequency-doubling device[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(09): 320-325.
李晓明, 沈学举, 刘恂, 等. KTP 倍频器件温度适应性扩展研究[J]. 物理学报, 2015, **64**(09): 320-325.
- [13] 于淼. 热致 BBO 相位失配对 266nm 紫外激光转换效率影响的研究[D]. 长春:长春理工大学,2013.
- [14] OKADA M, IEIRI S. Influences of self-induced thermal effects on phase matching in nonlinear optical crystals[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, **7**(12): 560-563.

-
- [15] YAO Jian-quan, YU Yi-zhong, CHEN Jin, *et al.* Thermal effect in KTP crystal during high power operation[J]. *Chinese Physics Letters*, 2001, **18**(10): 1356.
- [16] YU Kai, JIN Guang-yong, YU Miao, *et al.* Investigation on the influence of BBO thermal-induced phase mismatching in 266-nm UV laser conversion efficiency[C]. SPIE, 2014, **9294**: 92940Q.
- [17] CHEN Ying, ZHOU Yuan, WANG Zhi-you, *et al.* Improvement of the frequency-doubling efficiency of high-average-power lasers using multicrystal scheme with opposite thermal properties[J]. *Results in Physics*, 2017, **7**: 3530-3536.
- [18] WANG Chao, YU Miao, CHEN Xin-yu, *et al.* Influence of BBO temperature distribution on phase mismatching distribution in fourth harmonic[C]. SPIE, 2013, **8904**: 890414.
- [19] ZOU Xiao-lin, YAO Yu-cheng, HUANG Chu-yun, *et al.* In cavity SHG LBO temperature distribution influence on transfer efficiency[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2011, **9**(3): 21-23.
- [20] LI Long, SHI Peng, CHEN Hao-wei, *et al.* Temperature modeling of intracavity doubling frequency nonlinear crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(10): 1441-1444.
李隆, 史彭, 陈浩伟, 等. 非线性晶体内腔倍频的温度模式分布[J]. 光子学报, 2005, **34**(10): 1441-1444.
- [21] 高冬阳. 可见光至近红外相关光子辐射基准源技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2018.
- [22] 姚建铨. 非线性光学频率变换及激光调谐技术[M]. 科学出版社, 1995.