

文章编号: 1007-6654(2010)02-0109-05

飞秒脉冲泵浦的 II 类 BBO 晶体自发参量下转换光谱分布特性

陈君鉴, 白云飞, 刘洪雨, 樊代和, 张俊香, 部江瑞[†]

(量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电所, 山西 太原 030006)

摘要: 在理论上分析了飞秒脉冲泵浦的 II 类共线的自发参量下转换信号光与闲置光光谱的分布特征。由于非线性晶体色散的影响, 信号光与闲置光光谱分布不完全相同, 且这种差异会随着泵浦谱宽的增加而加大。同时在实验上测量了 II 类共线匹配的下转换信号光与闲置光的光谱分布。将理论分析与实验结果进行对比, 变化趋势是一致的。本文对连续变量单光子探测中的模式匹配及光子对四阶干涉的条纹可见度等相关量子光学测量有一定的指导意义。

关键词: 飞秒脉冲; 自发参量下转换; 光谱分布

中图分类号: O431 文献标识码: A

0 引言

自发参量下转换 (Spontaneous Parametric Down Conversion, SPDC) 光子对具有的时间、偏振、频率、自旋纠缠等特性, 在量子隐形传态、量子密钥分发、量子计算等量子信息研究中有重要应用^[1-3], 近年来成为量子光学、量子信息理论与实验研究的热点。

根据泵浦光种类的不同, SPDC 过程可分为连续光泵浦和脉冲光泵浦两种。前者可以产生明亮且保真度较高的关联光子对, 但由于 SPDC 过程的概然性, 其产生的光子对在时间上是完全随机的。而对于飞秒脉冲光泵浦的 SPDC, 一方面只有泵浦脉冲通过非线性晶体时才可能产生双光子对, 这就有效降低了光子对产生时间的不确定性, 另一方面脉冲的高峰值功率还可以提高光子对的产生几率。这种特性对单光子源制备或多光子对同步产生等需要确切知道下转换时间的应用有重要意义^[4-6]。

早期对 SPDC 过程光谱的理论和实验研究主要集中在连续光泵浦的情况^[7,8]。1997 年 Grice 和 Wamsley 研究了脉冲光泵浦的 SPDC 的光谱特性, 给出了宽带泵浦的 II 类 SPDC 光谱特性的理论模型。他们指出, 相对于连续光泵浦宽带 II 类共线 SPDC 的双光子具有不同的光谱, 且这种差异性会随泵浦光线宽的增加而更加明显^[6]。本文报道了飞秒脉冲光泵浦的 II 类共线 BBO 晶体的 SPDC 光谱的理论与实验研究, 研究结果对于飞秒脉冲下非经典光场的平衡零拍测量有重要意义。

1 理论分析

SPDC 是一个三波耦合过程。对 II 类相位匹配过程来说, 入射到非中心对称的非线性晶体上的泵浦光子和量子真空噪声以一定的概率相互作用而自发地分裂为能量较低且偏振相互垂直的一对光子。此时相互作用哈密顿量可以表示为^[8]

收稿日期: 2010-04-14

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60708010 No. 10774096); 国家重点基础研究发展计划 (973 项目) (No. 2010CB923102)

作者简介: 陈君鉴 (1985-), 男, 山西晋中人, 在读硕士研究生, 主要从事量子通信与量子测量方面的研究。E-mail: chenjunjian_1236@163.com

[†] 通讯作者, E-mail: jrgao@sxu.edu.cn

$$H_1(t) = \int_V d^3r \chi^{(2)} E_p^{(+)}(r, t) E_s^{(-)}(r, t) \times E_i^{(-)}(r, t) + H.c. \quad (1)$$

其中 $\chi^{(2)}$ 为二阶非线性系数, E 代表光波的电场振幅, 下标 s, i, p 分别代表信号光, 闲置光和泵浦光。为简化分析, 我们考虑共线的三波耦合并规定光沿 z 轴方向传播。在相互作用绘景中, 利用一阶微扰理论, 偏振纠缠的双光子态可以表示为:

$$|B\rangle = |0\rangle_s |0\rangle_i - 2\pi A \int d\omega_s \int d\omega_i \hat{a}_s^\dagger(\omega_s) \times \hat{a}_i^\dagger(\omega_i) \alpha(\omega_s + \omega_i) \Phi(\omega_s, \omega_i) + H.c. \quad (2)$$

上式中 A 为与积分元无关的常数, \hat{a}^\dagger 为与频率有关的光场产生算符, $\alpha(\omega_s + \omega_i)$ 为泵浦场的振幅包络。 $\Phi(\omega_s, \omega_i)$ 为相位匹配函数, 对于 II 类共线的 SPDC 过程其值就等于 $\text{sinc}\left[\Delta k \frac{L}{2}\right]$, 其中 $\Delta k = k(\omega_p) - k(\omega_s) - k(\omega_i)$ 代表相位失配量。从量子理论的角度来讲, SPDC 光场的性质完全由 $\alpha(\omega_s + \omega_i) \Phi(\omega_s, \omega_i)$ 决定。其中泵浦波包函数 $\alpha(\omega_s, \omega_i)$ 决定能量转换关系, 只有满足能量守恒条件 $\omega_p = \omega_s + \omega_i$ 时, 下转换过程才能进行。而对于某一给定的泵浦光, 相位匹配函数 $\Phi(\omega_s, \omega_i)$ 决定了泵浦光、信号光和闲置光三波耦合的效率, 也即泵浦光能量被如何分配。下面我们详细分析后者对 SPDC 光场的影响。

将 $\Phi(\omega_s, \omega_i)$ 以 SPDC 的简并频率 $\bar{\omega}$ 为中心进行泰勒级数展开得:

$$\begin{aligned} \Delta k &= \Delta k|_{\bar{\omega}} + \left(\frac{\partial \Delta k}{\partial \omega}\right)|_{\bar{\omega}} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \Delta k}{\partial \omega^2}\right)|_{\bar{\omega}} + \dots \\ &= [k(2\bar{\omega}) + (\omega - 2\bar{\omega})k'] - \\ & [k(\bar{\omega}) + (\omega - \bar{\omega})k'_s] - \\ & [k(\bar{\omega}) + (\omega - \bar{\omega})k'_i] + \dots, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 k'_s, k'_i 分别表示泵浦光、信号光和闲置光波矢对频率的偏导。上式中第一项表征相位失配, 第二项表征群速度失配, 第三项表征群速度色散^[10]。进一步假设在 $\bar{\omega}$ 处已经满足相位匹配且忽略二阶及其以上的项后, 我们有

$$\Delta k = v_s(k'_s - k'_p) + v_i(k'_i - k'_p) \quad (4)$$

其中 $v_{s(i)} = \omega_{s(i)} - \bar{\omega}$ 分别为 SPDC 两个不同偏振光场的频率与简并频率 $\bar{\omega}$ 的差值。通过

上面的转化, 实际上我们给出的是相位匹配函数 $\Phi(\omega_s, \omega_i)$ 与 $v_{s(i)}$ 的关系。而借助于对 $v_{s(i)}$ 的分析, 我们就可以间接给出 SPDC 光场的频谱特性。考虑到现有的实验条件, 以 II 类共线相位匹配 BBO 晶体为例, 计算过程中的具体参数选取如下, 晶体长度: $L = 0.6 \text{ mm}$; 泵浦光中心波长: $\lambda = 425 \text{ nm}$; 泵浦光谱型: 高斯型分布 $\alpha(2\bar{\omega} + v_s + v_i) = \exp\left[-\frac{(v_s + v_i)^2}{\sigma^2}\right]$, 泵浦光线宽: $\sigma = 2.35 \text{ nm}$ 。本文第二部分所有图中的 v_s 和 v_i 都已经归一化到连续光泵浦的 II 类参量下转换的带宽 $\Delta v_{\omega} = 2.78 / (|k'_s - k'_i| L)$ 上^[6]。

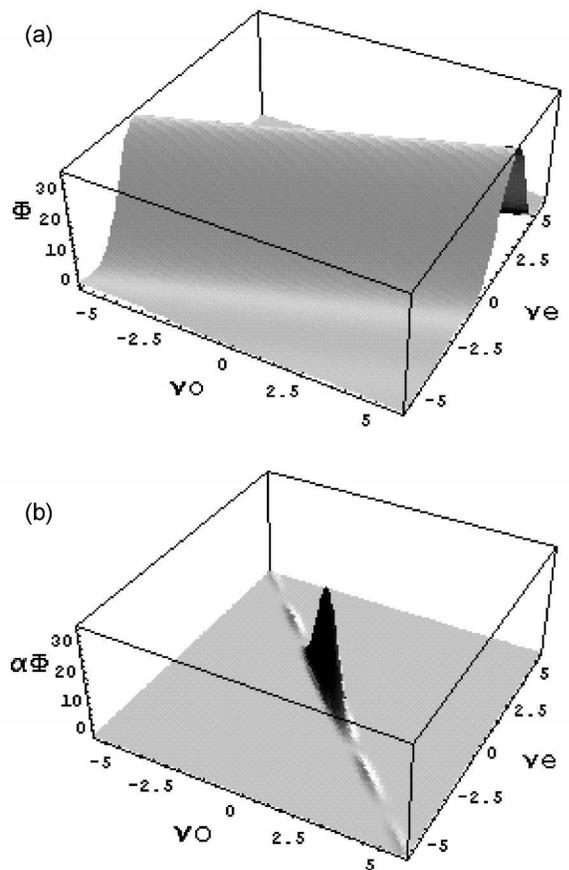


图 1 (a) 相位匹配函数; (b) 在泵浦波包函数调制下的相位匹配函数
Fig 1 Plot of Phase matching function alone (a) and multiplied by the pump envelope function (b).

图 1 (a) 为计算得到的 $|\Phi(\bar{\omega} + v_s, \bar{\omega} + v_i)|^2$ 随 v_s 和 v_i 变化的关系图。为反映出图形的整体变化趋势, v_s 和 v_i 的取值范围都取为 $[-6, 6]$ 。在此已经假设信号光为 \circ 光, 闲置光为 \bullet 光。

由图可见, 相位匹配函数整体呈“山”字状, 当 $v_s(k'_s - k'_p) = -v_i(k'_i - k'_p)$ 时, 相位匹配函数达到最大值。而在与之平行的方向上, 函数取值相同。

图 1(b) 是 $|\alpha(2\bar{\omega} + v_s + v_i)\Phi(\bar{\omega} + v, \bar{\omega} + v_i)|^2$ 随 v_s 和 v_i 变化的关系图。相对于图 1(a), 由于泵浦波包函数的作用, 下转换光场被限定在了简并频率附近的有限区域内。

需要强调的是, 对于相位匹配函数 $\Phi(\omega, \omega_i)$ 的给定的取值区间, 晶体的双折射效应使得 ω_s 和 ω_i 的允许取值范围不同, 这种非对称性将导致两个下转换光场的频谱不同。其频谱函数可分别表示为:

$$S_s(v) = \int dv_i |\alpha(|2\bar{\omega} + v + v_i) \times \Phi(\bar{\omega} + v, \bar{\omega} + v_i)|^2,$$

$$S_i(v) = \int dv_s |\alpha(|2\bar{\omega} + v + v_s) \times \Phi(\bar{\omega} + v, \bar{\omega} + v)|^2, \quad (5)$$

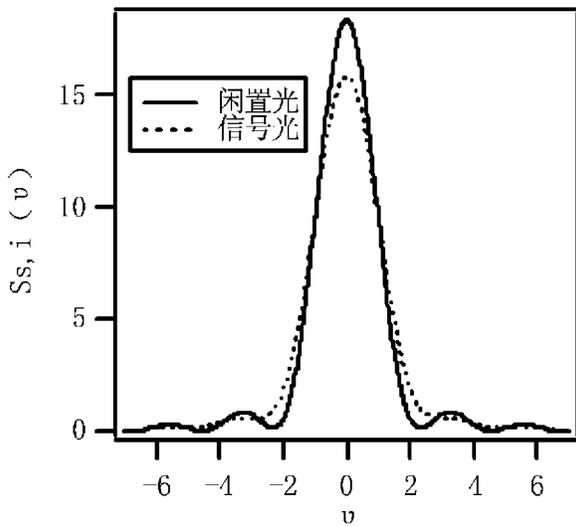


图 2 信号光与闲置光的光谱分布
Fig 2 Spectra of the signal and idle wave

图 2 给出了泵浦谱宽为 $1.5\Delta\omega_w$ 时的 II 类共线 SPDC 信号光与闲置光的光谱分布。从中可以看出一对下转换光场的频谱具有一定的差异。进一步地, 图 3 给出了下转换谱宽与泵浦谱宽之间的关系。从图中可以看出, 随着泵浦脉宽的增大, 信号光和闲置光场的谱宽差异逐渐减小, 当利用单色光泵浦时 (相当于脉宽足够大的情况) 两者将相同。

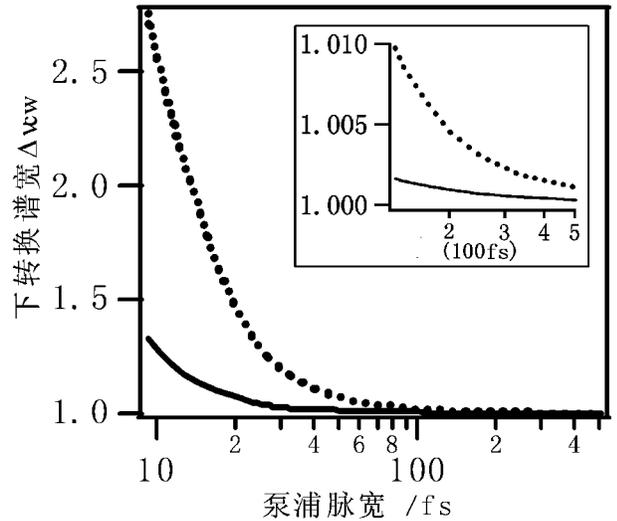
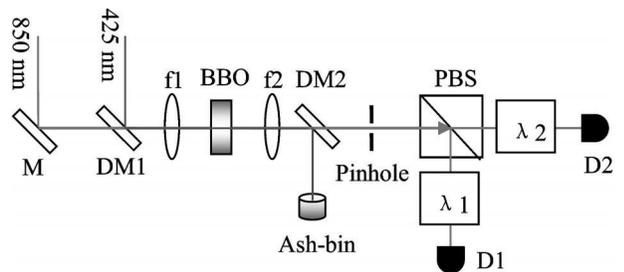


图 3 SPDC 光场谱宽随泵浦光谱宽的关系
Fig 3 Bandwidth of the SPDC wave packets vs pump bandwidth



PBS 偏振分束器, f 透镜, λ_1 λ_2 光谱仪, D 单光子探测器, M 850 nm 高反, DM1 425 nm 高反, 850 nm 高透, DM2 425 nm 高透, 850 nm 高反
PBS Polarization beam splitter, f Lens, λ_1 , λ_2 Spectrograph, D Single photon counting module, M HR@ 850 nm, DM1 HR@ 425 nm & HT@ 850 nm, DM2 HT@ 425 nm & HR@ 850 nm

图 4 SPDC 光谱测量装置

Fig 4 Apparatus for SPDC spectrum measurement

2 实验研究

我们利用飞秒脉冲光泵浦 II 类共线相位匹配的 BBO 晶体。实验装置如图 4 所示, 中心波长为 425 nm, 脉宽为 180 fs (谱宽为 2.35 nm) 的泵浦脉冲激光经透镜 f1 聚焦于厚度为 0.6 mm 的 BBO 晶体上。剩余的泵浦光被 DM2 反射, 而下转换光场经 f2 准直后再通过小孔以提取出共线的光子对, 最后由 PBS 将偏振相互垂直的信号光和闲置光分开。实验中我们使用 CCD 观察下转换光场的分布, 通过仔细调节晶体角度和小孔位置以确保 SPDC 过程是共线的。之后下转换光子对被分

别送入到 λ_1 和 λ_2 两个光谱仪中, 其输出由单光子探测器探测, 最后经过数据处理给出其频谱分布。中心波长为 850 nm 的辅助激光用于准直整个光路。

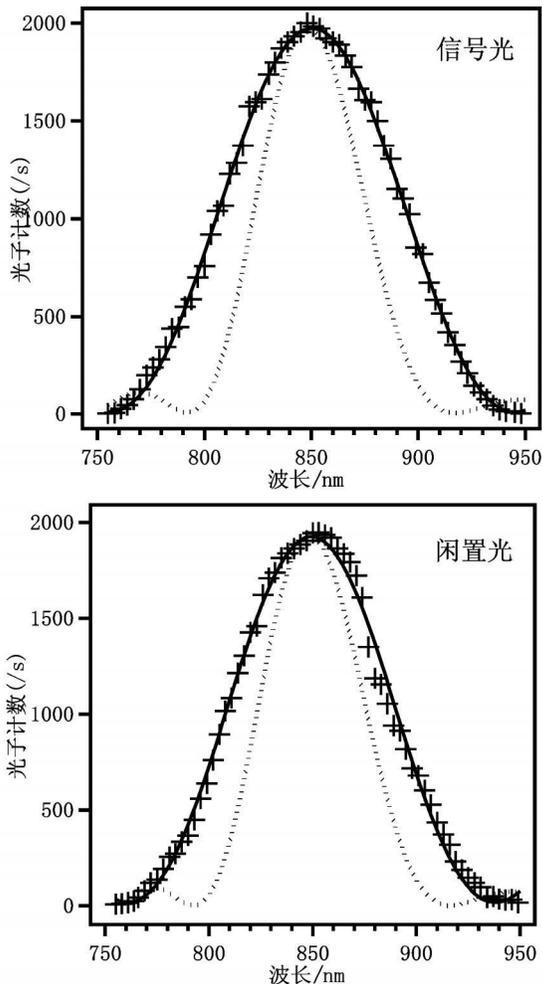


图 5 SPDC 光谱的实验结果与理论分析对比图
Fig 5 The contrast of experiment result and theory analyze of SPDC spectrum

图 5 为 SPDC 光场频谱分布的实验结果与理论分析的对照图。其中“+”为实验数据, 实线是

对实验数据的 Sinc 函数拟合, 虚线是理论计算结果。理论计算结果表明, 在当前的实验条件下, 信号光与闲置光的谱宽(半高全宽)分别应为 51.7 nm 和 51.6 nm, 二者的谱宽之比为 1.003。实验结果显示信号光与闲置光的谱宽(半高全宽)分别为 91.1 nm 和 85.1 nm, 二者比值为 1.071。

定性地来看, 实验结果与理论预测都反映出脉冲泵浦的 II 类 SPDC 的信号光与闲置光的频谱存在差别。但是定量分析的话, 理论分析与实验结果之间还是存在一定的差异。这主要是因为, 在理论计算中, 我们仅考虑了沿 x 轴传播的下转换光谱分布, 而在实际实验测量中, 我们使用了一个有限大小的小孔来选取下转换产生的关联光子对, 这样就会导致以 x 轴为中心, 小孔直径大小范围内的下转换光都进入光谱仪, 必然使谱线加宽, 从而导致实验测量到的谱宽较理论结果偏大。在我们的实验中小孔直径为 0.6 mm, 对应的孔径角为 4 度。理论计算中考虑到 4 度张角的谱分布, 粗略的估算, 对应的下转换信号光与闲置光的谱宽分别为 94 nm 和 83 nm, 二者比值为 1.13 与实验结果基本一致。

3 总结

脉冲光泵浦的 II 类共线 SPDC 过程产生的两个不同偏振的信号光与闲置光光场的频谱分布存在差异, 且这种差异会随着泵浦光线宽的增加而变得更加明显。而其原因在于 II 类相位匹配条件的特殊性。同时我们也在实验上观察到这种差异性。本文会对连续变量单光子探测中的模式匹配及光子对四阶干涉的条纹可见度等相关量子光学实验有一定的指导意义^[9-11]。

参考文献:

- [1] STREKALOV D V, SERGIENKO A V, KLYSHKO D N, et al. Observation of Two-photon "Ghost" Interference and Diffraction [J]. Phys Rev Lett 1995, 74: 3600-3603.
- [2] JENNEWENT, SMON C, WEHSG, et al. Quantum Cryptography with Entangled Photons [J]. Phys Rev Lett 2000, 84: 4729-4732.
- [3] BRAHML, ORRIM, Single-Photon Sources [J]. Rep Prog Phys 2005, 68: 1129-1179.
- [4] TMOIHY KELLER E, MORTON RUBIN H. Theory of Two-photon Entanglement for Spontaneous Parametric Down-conversion Driven by a Narrow Pump Pulse [J]. Phys Rev A 1997, 56(2): 1534-1541.
- [5] 樊代和, 白云飞, 张海龙, 等. 泵浦谱宽和测量带宽对 SPDC 过程产生的光子对分布的影响 [J]. 量子光学学

- 报, 2008 **4**(2): 109-113
- [6] GRICE W P WAIMSLEY I A Spectral Information and Distinguishability in Type-II Down conversion with a Broadband Pump [J]. Phys Rev A 1997 **56**(2): 1627-1634
- [7] HONG C K MANDEL L Theory of Parametric Frequency Down Conversion of Light [J]. Phys Rev A 1985 **31**(4): 2409-2418
- [8] MORTON RUBIN H DAVID KLYSHKO N SHIH Y H et al Theory of Two-photon Entanglement in Type-II Optical Parametric Down conversion [J]. Phys Rev A 1994 **50**(6): 5122-5133.
- [9] ACICHELE T LVOVSKY A J SCHILLER S Optical Mode Characterization of Single Photons Prepared by Means of Conditional Measurements on a Biphoton State [J]. Eur Phys J D 2002 **18**: 237-245
- [10] 杨义胜, 郑万国, 韩伟, 等. 宽带三倍频混频过程的群速匹配关系 [J]. 物理学报, 2007, **56**(11): 6468-6472
- [11] GRICE W P ERDMANN R WAIMSLEY I A Spectral Distinguishability in Ultra fast Parametric Down conversion [J]. Phys Rev A 1998 **57**(4): 2289-2292.

The Spectrum Distribution Property in Type-II BBO Crystal Down conversion with a Femtosecond Pulse Laser Pump

CHEN Jun-jian BAI Yun-fei LIU Hong-yu FAN Dai-he ZHANG Jun-xiang GAO Jiang-rui

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices Institute of Opto-Electronics Shanxi University Taiyuan 030006 China)

Abstract Spectrum distribution of spontaneous parametric down conversion is discussed in type-II phase matching process with a femtosecond pulse laser pump. The spectrum distribution of signal and idle beams are different from each other and the differences vary with the width of femtosecond pulse laser pump. We have also measured the spectrum distribution of type-II phase matching BBO crystal's spontaneous parametric down conversion beams. The results coincide with theoretical analysis. They are useful when measuring the light non-classical property with femtosecond pulse balance homodyne detecting system.

Key words femtosecond pulse spontaneous parametric down conversion spectrum distribution