

自发参量下转换双光子场应用研究进展*

孙利群 王佳 田芊

(清华大学精密仪器与机械学系 北京 100084)

张彦鹏 唐天同

(西安交通大学电子科学与技术系 西安 710049)

摘要 文章介绍了自发参量下转换双光子场的概念,重点总结了自发参量下转换双光子场应用研究的进展状况,并对该研究领域的发展进行了展望.

关键词 自发参量下转换,双光子,非经典光场,量子光学

ADVANCES IN SPONTANEOUS PARAMETRIC DOWNCONVERSION BIPHOTON FIELD APPLICATIONS

SUN Li-Qun WANG Jia TIAN Qian

(Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084)

ZHANG Yan-Peng TANG Tian-Tong

(Department of Electronic Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract The concept of the spontaneous parametric down-conversion (SPDC) biphoton field is introduced. The advances in SPDC biphoton field applications are described, and future trends in this area are presented.

Key words spontaneous parametric down-conversion, biphoton, non-classical light field, quantum optics

1 引言

1997年12月,英国著名刊物《自然》杂志以“量子隐形传态实验”为题,首先对利用自发参量下转换双光子实现量子隐形传态的成功实验进行了报道^[1],轰动了学术界和欧美新闻界.由于自发参量下转换双光子在实现量子隐形传态的过程中作为量子通道的相关粒子对起着举足轻重的作用,因而近年来科技界对自发参量下转换双光子场的研究兴趣猛增.

自发参量下转换双光子场固有的量子起源和极强的相关特性决定了它在非经典光场研究中的重要地位和作用.通过对自发参量下转换双光子场的研究,不仅可以揭示非经典场的各种特性,更重要的是对探索物理研究新方法,设计超越经典特性的新装置,都有着十分重要的意义.下面首先介绍自发参量下转换双光子场的概念,然后介绍并总结自发参量下转换双光子场应用研究的最新进展,并对该研究领域未来的发展方向进行展望.

2 自发参量下转换双光子场的概念

自发参量下转换双光子场是1970年由美国国家宇航局(NASA)电子研究中心的D. C. Burnham和D. L. Weinberg在光子计数实验中首先发现的^[2],但在当时没有引起足够的重视,甚至没有意识到它的非经典特性.直到1985年在实验室观察到光学压缩态之后,人们在寻找其他产生光学压缩态的方法时,才注意到了这种场的存在,并开始了对它的非经典特性及应用的研究.

自发参量下转换双光子场的产生是基于非线性光学中的二阶非线性效应.将辐射频率为 ω_p 、波矢为 k_p 的单体泵浦光射向一个二阶非线性极化率 $\chi^{(2)}$ 不为0的非线性晶体,那么这一抽运辐射的每一个光子,在被非线性晶体散射的过程中,会以一定的概率转化为频率分别为 ω_1, ω_2 ,波矢分别为 k_1, k_2 的两个光子(见图1),在满足相位匹配条件:

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_p, \quad k_1 + k_2 = k_p \quad (1)$$

* 国家重点基础研究项目(批准号:G1999033002)

2000-02-18收到初稿,2000-04-26修回

的方向上,转化概率取得极大值.在自发参量下转换过程中产生的两个光子分别称为信号光子和闲置光子,合称为自发参量下转换双光子.由自发参量下转换双光子对的集合构成的场称为自发参量下转换双光子场.

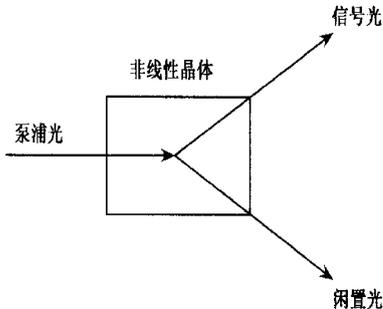


图1 自发参量下转换双光子场产生示意图

自发参量下转换双光子场的名称是由于产生下转换双光子场的过程类似于经典光场的参量混频过程而得来的,它们的共同之处在于都是强光非线性参量变换过程,即由于介质的非线性极化所导致的不同频率光波之间的能量耦合过程.在这一过程中,非线性介质并不参与能量的净交换,却使光波的频率发生变化,但自发参量下转换过程与一般的参量混频过程又有着本质的区别.一般的参量过程需要有两束光入射到非线性介质上,发生三波混频过程,而在自发参量下转换过程中只有一束抽运光作用在非线性介质上,晶体中的量子真空噪声则起了另一束光的作用;一般的参量过程仅用经典理论就可以处理,而自发参量下转换双光子场固有的量子起源就决定了它的产生机理必须用量子理论才能解释.

自发参量下转换过程中产生的信号光子和闲置光子具有高度的相关性,由这两个光子构成的态,称为双光子纠缠态.利用自发参量下转换双光子之间所特有的时间、空间、频率、偏振等高度相关特性,可以完成许多其他非经典光场和经典光场所不能胜任的工作.

3 自发参量下转换(SPDC)双光子场的应用研究

近十年来,自发参量下转换双光子场的应用研究异常活跃,已开发的应用领域涉及光学计量、激光技术、量子光学、光通信等众多领域.

光学计量是自发参量下转换双光子场的一个重要应用领域.最早开展这方面研究工作的是前苏联莫斯科大学的 D. N. Klyshko 教授及其合作者. D.

N. Klyshko 教授首先提出了基于自发参量下转换双光子的相关性绝对测量光电探测器量子效率的方案^[3].利用自发参量下转换双光子之间很强的时间和空间相关性,由测得的一个下转换光子的频率和方向,不但可以预言另一个下转换光子的存在,而且可以确定它的频率、方向和计数时间.根据这一原理就可以绝对地测量光电探测器的量子效率. D. N. Klyshko 教授的这一方案经全俄光学和物理计量研究院(VNIOFI)和美国国家标准和技术研究院(NIST)的改进和完善,现已能够测量光电探测器量子效率的光谱分布和空间分布^[4].

D. N. Klyshko 教授同时还提出了利用自发参量下转换双光子建立标准光子发生器的设想.如图2所示,用接收信号光子的光电探测器输出的电脉冲作为光快门触发信号,则通过光快门的闲置光子就只能是单个光子,根据这一原理可以制成单光子发生器^[5]. S. M. Tan, D. F. Wall 和 M. J. Collett 等利用单光子发生器实现了单光子态,并通过相位灵敏探测完成了只有一个入射光子的强度相关实验.在这一实验中,一个单光子可以选择进入两个零差探测器中的任何一个,在两探测器之间产生了非局域量子相关,从而证明了量子干涉是几率幅相干^[6].

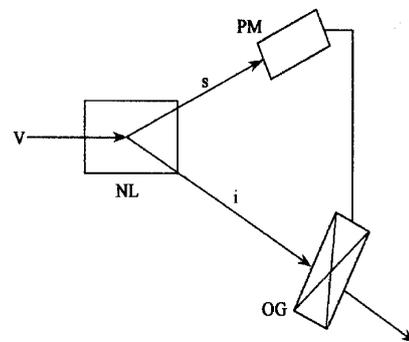


图2 单光子发生器原理示意图

V:抽运光;NL:非线性晶体;s:信号光;i:闲置光;
PM:光电探测器;OG:光快门

美国 NIST 的 A. L. Migdall 和 R. U. Datla 等人利用受激参量下转换双光子速率与自发参量下转换双光子速率的比值正比于产生诱发辐射光强的特性,将红外光强的测量转化为可见光强度的测量^[7].其实验原理如图3所示,利用自发参量下转换过程产生红外-可见光子对,将被测红外光源的入射方向调整到与下转换红外光子的出射方向相同.由于诱发辐射的作用,红外光子的出射速率增加,同时与其共轭的可见光子的出射速率也增加,且光子

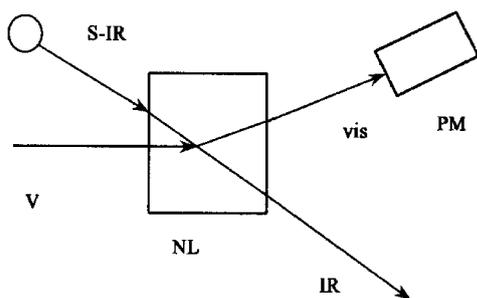


图3 基于 SPDC 双光子绝对测量
红外光谱辐射的原理示意图
(V:抽运光;NL:非线性晶体;S-IR:被测红外光源;
IR:红外光子;vis:可见光子;PM:光电探测器)

速率的增加程度正比于红外光源的辐射功率,因此,通过测量诱发辐射可见光子速率和自发辐射可见光子速率的比值,就可以得到红外光源的光谱辐射功率.这种测量方法不需要借助于任何标准探测器或标准光源,因而可以实现红外光谱辐射的绝对测量,而且用可见光探测器测量红外辐射较直接用红外光探测器测量有着更高的测量精度.

利用自发参量下转换双光子强度涨落相同的特性还可以测量极微弱的光吸收^[8].将被测样品放在一个下转换光束的光路上,另一束下转换光束作为参考光束.将下转换光频率调谐到被测样品的吸收波段,就可以测量微量光吸收.这一技术对于光谱分析研究有着极其重要的作用.

利用自发参量下转换双光子场的宽谱特性,可以研制固体可调谐激光器.将参量下转换器置于谐振腔内,对下转换光的某一频率信号通过振荡放大,就可以形成新的激光光源.通过调节晶轴方向或改变晶体温度来改变匹配波长,从而可以在一宽的范围内调谐激光的输出波长,由此得到全固化宽谱可调谐激光器.德国的 Lambda Physik 公司和美国的 Continuum 公司利用中国科学院福建物质结构研究所生产的 BBO、LBO 晶体,分别研制成功从 430—2000 nm 和 1450—4000 nm 的连续可调谐全固体激光器,我国也已成功研制出 415—2500 nm 的可调谐固体激光器^[9].这种小型可调谐全固体激光器在科研、工业、军事、娱乐等众多领域都有着广泛的应用.

中国科学院物理研究所的吴令安博士于 1986 年在美国 Texas 大学完成的光学压缩态实验就是利用简并自发参量下转换双光子场进行的.她所用的实验基本装置如图 4 所示,利用环形激光器输出的

0.53 μm 的 Nd:YAG 倍频激光泵浦由 MgO-LiNbO₃ 晶体构成的自发参量下转换器.压缩光产生于 1.06 μm 处,通过端腔镜,该镜对 0.53 μm 的光完全反射.为提供 1.06 μm 的本地振荡,将原始 Nd:YAG 激光器的部分输出通过分束片和偏振器输出到平衡零差探测器的另一通道,其位相通过滤波器调整,以适应测量需要.真空噪声水平由压缩光的阻塞决定,以使真空场入射到零差探测器的进入通道.实验给出最佳噪声水平比真空涨落减少 61%,同时也证明了参量下转换过程中产生的光子态为最小不确定度态^[10].美国 Rochester 大学和我国山西大学的光电研究所也都利用简并自发参量下转换双光子场完成了光学压缩态实验^[11,12].

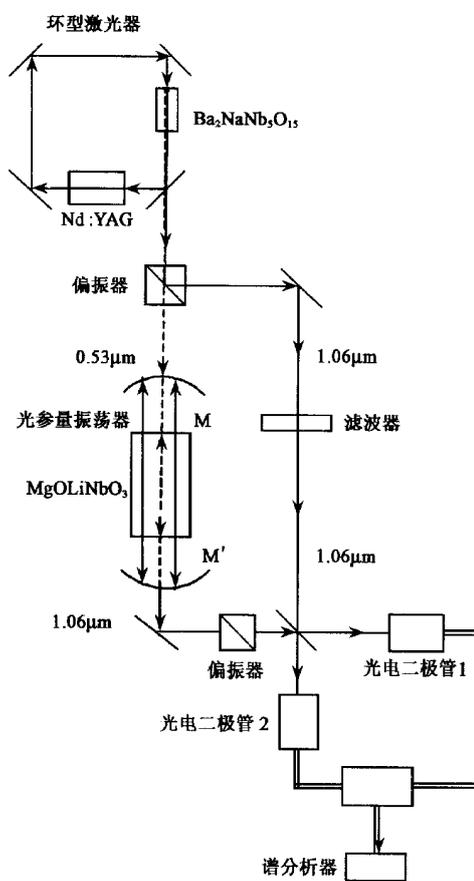


图4 利用 SPDC 光场产生压缩态的实验装置

美国 Maryland 大学的史砚华教授等人,利用自发参量下转换双光子场还完成了检验 Bell 不等式判据的强度相关实验,实验结果支持量子力学的基本假设^[13].

除了将利用自发参量下转换双光子场产生的光学压缩态用于光通信外,L. Mandel 早在 1984 年就提出了直接利用自发参量下转换光子对进行光通信的设想^[14].其实验原理如图 5 所示,将要传递的信

息(如二进制编码)通过调制器加载在抽运光 v 上,则下转换双光子就携带了这些信息.利用下转换双光子很强的时间相关性,通过符合探测,可以将淹没在较大噪声中的双光子信号提取出来,进而达到提取有效信号的目的.目前这一技术尚处于研究阶段,有效提高光参量下转换效率是这一技术实际应用的关键.

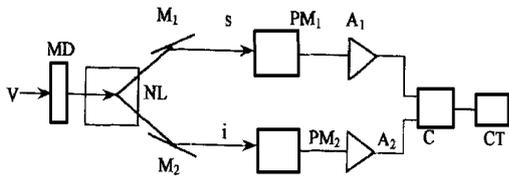


图5 用自发参量下转换双光子场实现光通信的原理示意图
(v :抽运光; MD:调制器; NL:非线性晶体; s :信号光; i :闲置光;
 M_1, M_2 :平面反射镜; PM_1, PM_2 :光电探测器; A_1, A_2 :甄别放大器;
C:相关器; CT:计数器)

英国的 A. E. Ekert 于 1991 年提出了用双光子纠缠态实现量子密码通信的设想^[15],称为 EPR 协议.在 EPR 公钥分配协议中,相关粒子源可用自发参量下转换过程中产生的下转换光子对,其中一个光子由信息发送者接收和探测,另一个相关光子则由信息接受者接收和测量.信息发送者和信息接受者双方都随机选择共轭基进行测量,基相同的测量结果保留作为密码本,基不相同的数据也保留用于 Bell 不等式判据的检验.如果违反不等式,得到量子的预期值,表明量子信道是畅通的;如果不等式满足,说明信道出了问题,即存在窃听者,信息发送者扮演了经典“隐变量”的角色.英国的国防部门曾尝试过用自发参量下转换双光子实现量子密码通信的方案,将 He - Cd 激光器 441.6 nm 波长的光入射到 $LiIO_3$ 晶体上,产生的下转换双光子分别送到发送者和接受者的 Mach - Zehnder 干涉仪中,两台干涉仪相距 4.7 km^[16].发送者随机选择其干涉仪的相位为 0 或 $\pi/2$,接受者同时随机选择相位为 0 或 $-\pi/2$,当两个相位之和为 0 或 2π 的整数倍时,发送者和接受者的光子互相关联,对应的数据作为密码本保留.这种方案技术难度大,波长不适合于长距离光纤通信^[17],目前还未见过更长距离的实验报道.

利用自发参量下转换双光子的偏振纠缠特性,还可以实现量子隐形传态^[18,19].量子隐形传态的基本思想是:为实现传送某个物体的未知量子态,可将原物的信息分成经典信息和量子信息两个部分,它们分别经由经典信道和量子信道传送给接受者.经典信息是发送者对原物进行某种测量而获得的,量

子信息是发送者在测量中未提取的其余信息.接受者在获得这两种信息之后,就可以制造出原物完美的复制品.在这个过程中,原物并未被传送给接受者,它始终留在发送者处,被传送的仅仅是原物的量子态.发送者甚至可以对这个量子态一无所知,而接受者是将别的物质单元(如粒子)变换成为处于与原物完全相同的量子态,原物的量子态在发送者进行测量及提取经典信息时已遭破坏,因此这是一种量子态的隐形传送.

量子隐形传态实验的主要困难在于制备作为量子通道的 EPR 粒子对(即两粒子的最大纠缠单重态)和联合测量 Bell 基态,以及对单个粒子的任意么正变换操作.简并 II 类自发参量下转换过程中产生的双光子频率相同但偏振态彼此正交,正好可以作为 EPR 粒子对.奥地利学者于 1997 年底在《Nature》上,意大利学者于 1998 年初在《Physical Review Letters》上^[20],分别报道了利用自发参量下转换双光子实现量子隐形传态的实验结果.两组实验都是采用单个光子偏振态作为待传送的量子态,而自发参量下转换双光子作为 EPR 粒子对.他们又有所不同,奥地利小组使用的抽运光源是 200 fs 的脉冲激光器,而意大利小组使用的是连续氩离子激光器;作为量子隐形传态所用的 EPR 粒子对,虽然两组实验用的都是自发参量下转换双光子,但奥地利小组利用了下转换双光子之间的偏振纠缠特性,而意大利小组则利用了下转换双光子之间的空间(波矢 k)纠缠特性.量子隐形传态的实验成功更激发起人们的研究热情,它将在量子计算和量子通信等方面获得重要的应用.

由上面所介绍的众多应用可以看出,自发参量下转换双光子场的相关特性有许多重要应用.在这些应用场合中,自发参量下转换双光子场所起的作用不仅是一般的经典光场所无法取代的,而且也令其他的非经典光场望尘莫及.

4 结束语

自发参量下转换双光子场的研究历史虽然不长,但其应用范围已经相当广泛.然而,利用自发参量下转换双光子场固有的非经典特性,设计、完成超越经典特性的新实验和新装置,探索物理研究新方法,还有相当多的工作要做.一方面,在从量子层次上进一步揭示自发参量下转换双光子场本身的非经典特性的同时,还可通过自发参量下转换双光子场

与物质的相互作用,研究物质原子的量子特性;另一方面,通过深入研究自发参量下转换双光子场的产生机理,探索提高自发参量下转换双光子产额的有效途径,以提高自发参量下转换双光子场的实用性,并进一步拓宽其应用领域。

自发参量下转换双光子场重要的实用价值和广泛的应用前景,已经引起了众多科技工作者的关注,它在光通信中显现出来的优势则更加令人鼓舞。以自发参量下转换双光子场和光学压缩态为代表的非经典光场,在科学技术高度发展的今天,正在发挥越来越重要的作用。有理由相信,在即将来临的 21 世纪,量子理论的发展和应用将会有更加灿烂辉煌的前景。

参 考 文 献

[1] Bouwmeester D, Pan J W, Mattle K *et al.* Nature, 1997, 390 : 575
 [2] Burnham D C, Weinberg D L. Phys. Rev. Lett., 1970, 25 : 84
 [3] Klyshko D N, Sov J. Quantum Electron, 1980, 10 : 1112
 [4] Migdall A L, Datla R U, Sergienko A V. Metrologia, 1996, 32 : 479
 [5] Klyshko D N. Photons and nonlinear optics. New York : Gordon & Breach, 1988. 325

[6] Hong C K, Mandel L. Phys. Rev. Lett., 1986, 56 : 58
 [7] Migdall A L, Datla R U, Sergienko A V *et al.* Appl. Opt., 1998, 37 : 3455
 [8] Wall D F, Milburn G J. Quantum Optics. Berlin : Springer Verlag, 1994. 7
 [9] Zhu X D, Deng L. Appl. Phys. Lett., 1992, 61 : 1490.
 [10] Wu L A, Xiao M, Kimble H J. J. Opt. Soc. Am. B, 1987, 4 : 1465
 [11] Friberg S F, Mandel L. Opt. Commun., 1984, 48 : 439
 [12] 彭 辉, 黄茂金, 刘晶等. 物理学报, 1993, 42 : 1079 [PENG Kur-Chi, HUANG Mao Jin, LIU Jing *et al.* Acta Physica Sinica, 1993, 42 : 1079 (in Chinese)]
 [13] Pittman T B, Shih Y H, Sergienko A V *et al.* Phys. Rev. A, 1995, 51 : 3495
 [14] Mandel L. J. Opt. Soc. Am. B, 1984, 1 : 108
 [15] Ekert A E. Phys. Rev. Lett., 1991, 67 : 661
 [16] Ekert A E, Rarity J G, Tapster P R *et al.* Phys. Rev. Lett., 1992, 69 : 1293
 [17] 吴令安, 物理, 1998, 27 : 544. [WU Ling-An. Wuli (Physics), 1998, 27 : 554 (in Chinese)]
 [18] 郭光灿, 郭涛, 郑仕标等. 物理, 1999, 28 : 120 [GUO Guang-Can, GUO Tao, ZHENG Shi-Biao *et al.* Wuli (Physics), 1999, 28 : 120 (in Chinese)]
 [19] Bennett C H, Brassard G, Crepeau C *et al.* Phys. Rev. Lett., 1993, 70 : 1895
 [20] Boschi D, Branca S, Martine F D *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 80 : 1121

(上接第 742 页)

个,还有一个与量子囚徒怪圈比较类似的模型,只是对策矩阵的各数值间的大小顺序不同^[8]。

经典对策量子化的方法主要是引入量子力学中的叠加性以及利用纠缠态。但是对于大部分实例,叠加策略在测量后又化为经典混合策略,并不出现新结果。本文前两个例子都是多步对策,利用了多步量子操作的优点:即量子干涉,所以会带来新的结果。第三个例子则是引入了纠缠,即利用 \hat{J} 变换把爱丽丝和鲍博所处的状态纠缠起来,这也是经典情况不能做到的,从而促使两位局中人采用非完全对抗策略。

作为一个新兴分支,量子对策无疑给量子信息学引入了新的研究方法,即用研究对抗或竞争现象的方法来研究量子算法和量子密码^[5]。而且量子力学的方法又将具有悠久历史的经典对策论拓展到一

片崭新的天地。

参 考 文 献

[1] Straffin P D. Game Theory and Strategy, The Mathematical Association of America, 1993.
 [2] Jones A J. Game Theory: mathematical models of conflict, Chichester: Ellis Horwood Limited, 1980.
 [3] Eisert J, Wilkens M, Lewenstein M. Phys. Rev. Lett., 1999, 83 : 3077; Benjamin S C, Hayden P M. arXiv: quant-ph/0003036; Eisert J, Wilkens M. arXiv: quant-ph/0004076.
 [4] Goldenberg L, Vaidman L, Wiesner S. Phys. Rev. Lett., 1999, 82 : 3356.
 [5] Meyer D A. Phys. Rev. Lett., 1999, 82 : 1052; van Enk S J. Phys. Rev. Lett., 2000, 84 : 789; Meyer D A. Phys. Rev. Lett., 2000, 84 : 790; Meyer D A. arXiv: quant-ph/0004092.
 [6] Grover L K. Phys. Rev. Lett., 1997, 79 : 325.
 [7] Zhang Y S, Li C F, Guo G C *et al.*, arXiv: quant-ph/0001008.
 [8] Marinatto L, Weber T. arXiv: quant-ph/0004081.