

基于自发参量下转换的宽光谱分布实验研究

高冬阳^{1,2} 夏茂鹏² 胡友勃² 刘岩² 盛文阳² 李健军² 郑小兵²

¹安徽大学物理与材料科学学院, 安徽 合肥 230031

²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, 安徽 合肥 230031

摘要 研究相关光子光场的光谱分布对基于自发参量下转换的光电探测器的宽波段辐射定标具有重要意义。建立了相关光子宽光谱分布测量实验系统。利用 355 nm 连续波(CW)激光抽运 BBO 晶体产生 I 类非共线自发参量下转换, 使用光子计数系统测量了相关光子在晶体后端的光谱分布, 测量的相关光子光谱分布带宽为 259 nm(550~808 nm)。相关光子的光谱角分布测量结果与理论模拟结果近似, 相对误差小于 2%。实验结果表明相关光子存在着可见-近红外宽波段光谱分布, 有望应用于光电探测器的宽光谱定标。

关键词 非线性光学; 自发参量下转换; 光子计数; 宽光谱分布

中图分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.051902

Research on Broadband Spectrum Distribution Based on Spontaneous Parametric Down Conversion

Gao Dongyang^{1,2} Xia Maopeng² Hu Youbo² Liu Yan² Sheng Wenyang²

Li Jianjun² Zheng Xiaobing²

¹School of Physics & Material Science, Anhui University, Hefei, Anhui 230031, China

²Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract Research on spectrum distribution of correlated photon optics-field has great significance in terms of the calibration for photoelectric detector in broadband spectrum based on spontaneous parametric down-conversion. An experiment is set up to measure the distribution of correlated photon broadband spectrum. A continuous wave 355 nm laser and a photon counting system are used to pump the β -barium borate (BBO) crystal to product type I spontaneous parametric down-conversion in the regime of nonlinear and the spectrum distribution of correlated photon outside the BBO crystal is measured, respectively. The bandwidth of correlated photon spectrum in experiment is 259 nm (550~808 nm). The angle distribution result in experiment is in accordance with the theory prediction, with the angle distribution difference less than 2%. It is turned out that a broad band spectrum distribution from visible to near infrared exists with respect to correlated photon. It is promising to be applied to calibration for photoelectric detector in broadband spectrum.

Key words nonlinear optics; spontaneous parametric down-conversion; photon counting; broad band distribution

OCIS codes 190.4975; 330.6280; 040.5160

1 引言

目前国际上光电探测器的光谱响应函数的传统定标方法都是采用高精度黑体和低温绝对辐射计作为初级标准,再经过一系列的标准传递链到达用户遥感器。它们共同的特点是需要建立高精度的初级标准和标准传递链,标准传递链会引入较大的测量不确定度^[1-2]。基于参量下转换的定标技术克服了传统方法的局限性。该方法是利用参量下转换效应产生的相关光子作为定标光源,不需要初级标准和复杂的标准传递

收稿日期: 2014-11-12; 收到修改稿日期: 2015-01-05; 网络出版日期: 2015-03-25

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

作者简介: 高冬阳(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学遥感器辐射定标技术等方面的研究。E-mail: dyanggao@163.com

导师简介: 郑小兵(1969—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光辐射精确测量和光学遥感辐射定标技术等方面的研究。

E-mail: xbzheng@aiofm.ac.cn(通信联系人)

链,因此,理论上这种方法具有更好的定标精度。

在国内,中国科学院安徽光学精密机械研究所的郑小兵课题组通过对BBO晶体的相位匹配角度调节,制备了633 nm/789 nm和702 nm/702 nm两对相关光子对,报道了4.16%的定标精度^[3-6]。中国计量科学研究院、中国科学院半导体研究所和中国科学院物理研究所等也采用类似的方法制备了相关光子对^[7-9],报道了国内最高的0.7%的定标精度^[7]。在国外,基于相关光子定标技术的研究起步较早,法国INM^[10]、意大利IEN^[11]、英国NPL^[12]和美国NIST^[13]等研究小组致力于分析定标不确定度来源和提高基于相关光子的定标技术的不确定度的研究,也通过调节晶体相位匹配角制备一对或两对相关光子对,测量到的相关光子光谱范围为200 nm^[14]。目前美国NIST报道的最高测量不确定度为0.18%^[13],与国际公认的绝对低温辐射计传递量值比较,差异优于0.14%,从实验上证明了该方法的可行性。

上述报道的共同特点是需要调节晶体的相位匹配角来制备不同波段相关光子对,调节过程对晶体旋转的精度要求很高。针对旋转晶体的缺点,安徽光学精密机械研究所设计出了能产生宽波段的相关光子的非线性晶体,测量了相关光子在信号通道的光谱分布^[15]。随着光学传感器向高分辨、宽波段的应用需求,基于相关光子的定标技术扩展用于宽波段定标方面十分必要。从拓宽定标波段出发,本文开展了宽波段相关光子的光谱空间分布测量研究。数值模拟了相关光子的光谱空间分布,并用单光子计数系统验证与理论的一致性,为光电探测器的宽波段定标提供理论和实验依据。

2 宽波段相关光子的光谱空间分布理论

在I类自发参量下转换(SPDC)过程中,一个高频的光子非线性晶体内部会以某一概率自发地湮灭成两个低频光子,并且这两个光子的偏振方向与抽运光子的偏振方向正交,整个过程满足能量守恒和动量守恒条件^[16],该条件叫做完全相位匹配条件

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

$$\mathbf{k}_p = \mathbf{k}_s + \mathbf{k}_i, \quad (2)$$

式中 ω 表示光子的频率, \mathbf{k} 表示光子波矢,下标p,s,i分别表示抽运光、信号光和空闲光。

该过程产生的相关光子光场是由抽运光子和量子真空噪声的综合作用产生的^[16],如图1所示。图中 E_1 , E_2 , $E_{1,2}$ 分别表示原子基态能级、激发态能级和虚能级。量子真空噪声与原子相互作用引发生自发辐射过程,强抽运光子(ω_p)与自发辐射光子(ω_s)在非线性晶体内混频,通过差频过程使低频的自发辐射光子(ω_s)得到放大,并伴随着另一低频光子(ω_i)的产生,由此形成了相关光子光场。

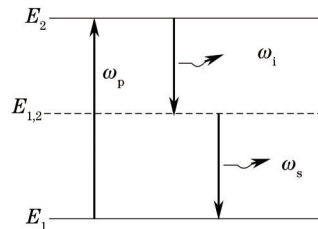


图1 SPDC过程示意图

Fig.1 Sketch map of of SPDC process

理论上,SPDC过程产生相关光子的光谱分布是从抽运光频率到晶体晶格共振频率的宽光谱连续分布^[17]。在完全相位匹配条件下,抽运光矢、信号光矢、空闲光矢构成一个矢量三角形,如图2所示。图中OA表示晶

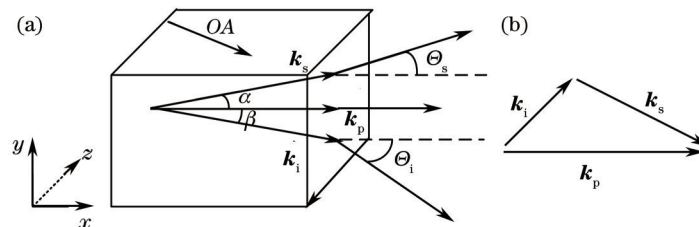


图2 非共线相位匹配原理图

Fig.2 Schematic of non-collinear phase-matching (PM)

体光轴方向; α, β 分别表示信号、空闲光在晶体内的非共线角; Θ 表示相关光子在晶体后端面的折射角。

根据(1)式和(2)式以及折射定律,假设抽运光波长 λ_p 为 355 nm,非线性晶体为 BBO 晶体(相位匹配角为 36°),模拟了在完全相位匹配条件下相关光子在晶体内部的非共线角和晶体后端面的折射角的分布,如图 3 所示。由于晶体的有限长和色散,在实际的 SPDC 过程中总会存在相位失配,根据 Devaux 等^[18]的放大传递函数理论模型,非完全相位匹配条件下的相关光子角度分布与完全相位匹配条件下的角度分布存在差异:在完全相位匹配条件下,波长为 λ 的相关光子仅在与之匹配的 α 方向出现;在非完全相位匹配条件下,信号光在 α 方向附近都存在,即信号光出现的角度范围展宽了。

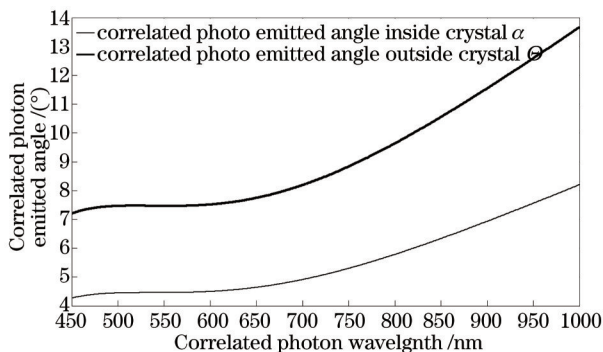


图3 相关光子在晶体内的非共线角和后端面的折射角的分布

Fig.3 Distrubtion of correlated-photon emitted angle inside α and outside Θ of the BBO-crystal

3 相关光子宽光谱分布实验测量系统

宽波段相关光子出射角分布测量光路,如图 4 所示。其中 a 轴和 b 轴是在同一水平面内,并相互成一定角度。

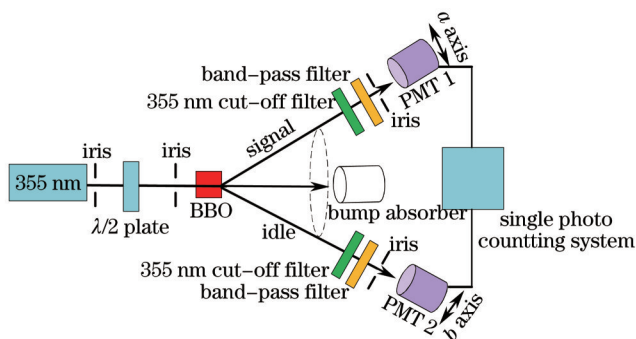


图4 宽波段相关光子出射角分布测量系统

Fig.4 Measurement system of the distrubtion of broadband correlated photon emitted angle

采用 355 nm(垂直偏振)作为抽运激光光源。BBO 晶体作为非线性晶体,晶体的尺寸为 $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,晶体的相位匹配角为 36° ,晶体前表面镀 355 nm 增透膜,后表面镀 450~1100 nm 增透膜。为了能在实验过程中关闭 SPDC 过程和扣除背景计数,在晶体前放置了 355 nm 半波片。抽运光吸收池用来收集未进行自发参量下转换的抽运光子。采用光电倍增管(PMT)探测相关光子,并将 PMT 放置在电控位移台上,能够对 PMT 进行左右、上下、俯仰调节,调节 PMT 的中心高度使其与 BBO 晶体中心高度一致。PMT1、PMT2 分别距离晶体 80、110 cm。PMT 前放置的光阑直径为 4 mm,整个实验装置在一个平面内。

为了能够探测到相关光子,在 PMT 探测窗口前,依次放置了 355 nm 截止滤光片和窄带干涉滤光片。截止滤光片能够滤除晶体的散射光和环境的杂散光,窄带干涉滤光片也能滤除背景光,并能够选择待探测的相关光子波长。最终,背景光的截止深度控制在 10^{-7} 数量级。考虑到 PMT 的光谱响应范围的限制,本实验选择的待探测的相关光子波长分别为 550 nm(10 nm FWHM)、645 nm(10 nm FWHM)、700 nm(10 nm FWHM)、808 nm(17 nm FWHM),FWHM 代表窄带干涉滤光片的半峰全宽。其中信号光通道待探测的波长为 550、645 nm,空闲光通道待探测的波长为 700、808 nm。

在信号处理部分,采取前置放大和甄别模式,单光子计数系统如图 5 所示。PMT(滨松 R2949)探测到的

负脉冲信号,经过前置放大器(Oretc 9603,放大带宽 1 GHz)放大后输入至甄别器(Oretc 583B,甄别电平调节范围为 $-5\text{ V}\sim-30\text{ mV}$),最后输入到双通道计数器(Oretc 994)。为了使单光子计数系统信噪比(SNR)最佳,对比不同甄别电平下的光子计数信噪比,选出最优的甄别电平值。计数器采集信号的时间设置为 10 s 。

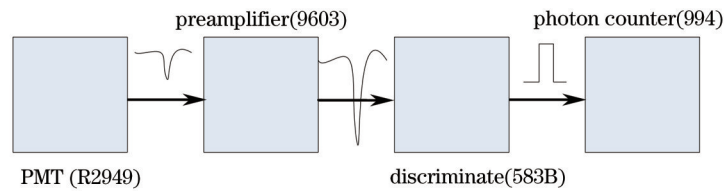
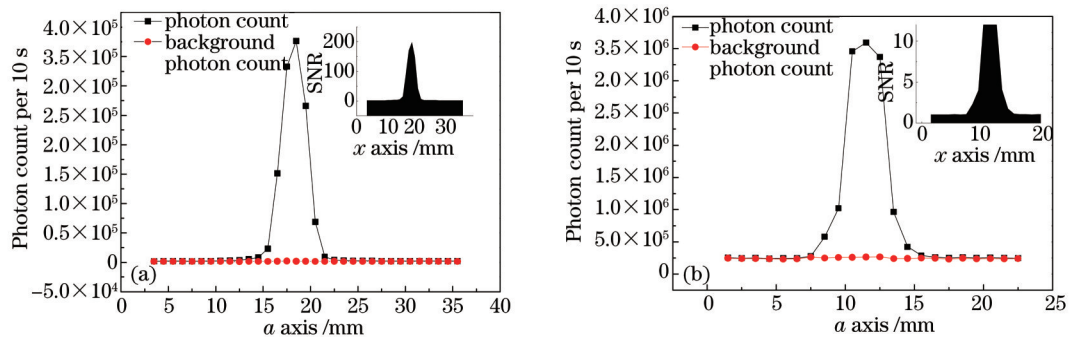


图5 单光子计数系统

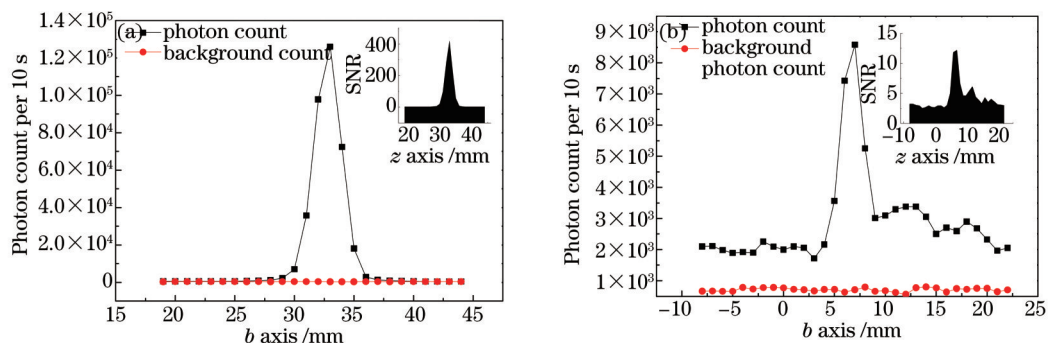
Fig.5 System of the single photon counting

4 实验结果与分析

整个实验过程在暗室完成,基本隔绝了外界环境的杂散光。根据图3的模拟结果,我们可以知道相关光子的出射方向。对PMT进行一维扫描,扫描的最小步长为 1 mm ,光子计数器的计数为 10 s 。探测 550 nm 和 645 nm 信号光的PMT在 a 轴进行一维扫描,实验结果如图6所示。

图6 (a) 645 nm和(b) 550 nm信号光在一维坐标 a 轴的光子数分布Fig.6 (a) 645 nm and (b) 550 nm signal correlated photon counting rate distribution at a axis

实验过程中,通过旋转半波片来记录背景计数。图6中的信噪比表示信号计数与背景计数的比值。由于在PMT前放置了窄带干涉滤光片,光子计数最大的坐标位置为相关光子的实际出射方向。类似地,在 b 轴方向进行一维扫描,扫描的步长设为是 1 mm ,光子计数时间为 10 s 。实验结果如图7所示。

图7 (a) 700 nm和(b) 808 nm空闲光在一维坐标 b 轴的光子数分布Fig.7 (a) 700 nm and (b) 808 nm idle correlated photon counting rate distribution at b axis

对比图6和图7,相同之处是扫描的光子计数的曲线都有峰值,并且其FWHM约为 2 mm 。这是因为在PMT前放置了 4 mm 光阑,坐标移动的步距小。PMT-1的探测视场角为 5 mrad ,PMT-2的探测视场角约为 4 mrad 。不同之处是不同波长的信噪比和光子计数率都有很大的差别。这是因为,在进行光子计数曲线扫描时,实验所设置的甄别器的电平和前置放大器的放大倍数不一致,并且,不同波长PMT的量子效率也不一致。特别的,在图7中,808 nm的光子计数信噪比最小,光子计数抖动比较明显,这是因为PMT在808 nm波段的量子效率低,并且808 nm光子速率理论值比其他三个波段的光子速率理论值低,导致光子计数信噪比

低。将图7和图8的相关光子出射的坐标位置换算成相关光子与抽运光的夹角,与图3理论模拟的角度基本一致,最大偏差优于2%。

为了进一步证实相关光子的出射方向,在光子计数最大的坐标位置,通过旋转半波片观察光子计数的变化,归一化结果如图8所示。

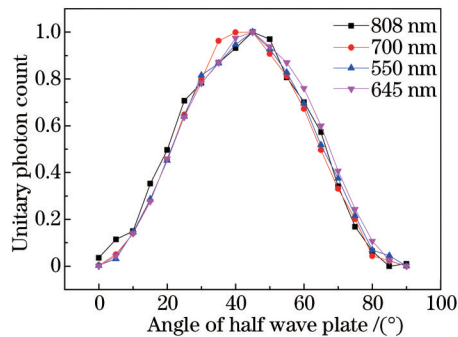


图8 光子计数对比半波片偏转

Fig.8 Photon counts versus pump polarization

当半波片旋转至 45° ,抽运光偏振方向在晶体的快轴方向,晶体内部产生I类非共线SPDC效应。当半波片旋转至 0° 或 90° ,抽运光偏振方向在晶体的慢轴方向,晶体内部不产生SPDC效应。当半波片旋转至其他角度时,抽运光矢在晶体快轴方向的投影分量产生SPDC效应,相关光子速率随半波片旋转角度呈正弦函数变化。

5 结论与展望

本文开展了宽波段相关光子的光谱空间分布研究,数值模拟了相关光子的光谱空间分布,并利用单光子探测系统进行测量,探测的光谱带宽为 259 nm ($550\sim 808\text{ nm}$),测量结果表明,4个波长的相关光子出射角度与理论模拟的角度基本一致,偏差优于2%。研究表明相关光子具有可见光~近红外宽光谱的空间分布,有望应用于单光子探测器在宽波段(可见光~近红外波段)定标。

参考文献

- 1 Zheng Xiaobing, Wu Haoyu, Zhang Junping, *et al.*. Absolute spectral responsivity standard detectors with uncertainty less than 0.035%[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(6): 749-752.
郑小兵, 吴浩宇, 章骏平, 等. 不确定度<0.035%的高精度光谱辐射功率标准[J]. *光学学报*, 2001, 21(6): 749-752.
- 2 Li Jianjun, Zheng Xiaobing, Lu Yunjun, *et al.*. Accurate calibration of the spectral responsivity of silicon trap detectors between 350 nm and 1064 nm[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(9): 6273-6278.
李健军, 郑小兵, 卢云君, 等. 硅陷阱探测器在350 nm~1064 nm波段的绝对光谱响应度定标[J]. *物理学报*, 2009, 58(9): 6273-6278.
- 3 Li Jianjun, Zheng Xiaobing, Feng Yu, *et al.*. The research of spontaneous parametric down-conversion and its application in the optics metrology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, 42(7): 1-11.
李健军, 郑小兵, 冯瑜, 等. 自发参量下转换的研究及其在光学计量中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, 42(7): 1-11.
- 4 Yu Feng, Xiaobing Zheng, Jianjun Li, *et al.*. Research in absolute calibration of single photon detectors by means of correlated photons[J]. *Chin Opt Lett*, 2006, 4(6): 315-317.
- 5 Jianjun Li, Xiaobing Zheng, Yunjun Lu, *et al.*. Quantum efficiency calibration of opto-electronic detector by means of correlated photons method[J]. *Chin Opt Lett*, 2008, 6(7): 472-475.
- 6 Li Jianjun, Zheng Xiaobing, Lu Yunjun, *et al.*. Optical radiometric calibration based on parametric down-conversion effect[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(12): 2325-2329.
李健军, 郑小兵, 卢云君, 等. 基于参变下转换效应的光辐射定标方法[J]. *光学学报*, 2008, 28(12): 2325-2329.
- 7 Lü Liang, Zhang Yinchao, Lin Yandong. Research on absolute calibration of photodetector quantum-efficiency using entangled photons[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0112004.
吕亮, 张寅超, 林延东. 纠缠光子法绝对定标光电探测器量子效率的研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0112004.
- 8 Wu Ling'an, Chen Xihao, Zhai Yanhua, *et al.*. Absolute self-calibration of single-photon detectors with cw and pulsed

- spontaneous parametric down-conversion[C]. SPIE, 2006, 6305: 630505.
- 9 Lu Shulong, Liu Bo, Sun Baoquan, *et al.*. Absolute measurement of detector quantum efficiency using optical parametric down-conversion pumped by femtosecond laser pulses[J]. Measurement Science and Technology, 2002, 13(12): 186-189.
- 10 A Ghazi-Bellouati, A Razeta, J Bastie, *et al.*. Detector calibration at INM using a correlated photons source[J]. Eur Phys J Appl Phys, 2006, 35(3): 211-216.
- 11 G Brida, S Castelletto, C Novro. Measurement of quantum efficiency of photodetectors by parametric fluorescence[J]. Metrologia, 1998, 35(4): 379-401.
- 12 J Y Cheung, C J Chunnillal, P J Thomas, *et al.*. Photon-counting measurement challenges[C]. SPIE, 2007, 6583: 65830G.
- 13 S V Polyakov, A L Migdall. High accuracy verification of a correlated photon-based method for determining photon-counting detection efficiency[J]. Opt Express, 2007, 15(4): 1390-1404.
- 14 A L Migdall, R U Datla, A Sergienko, *et al.*. Absolute detector quantum-efficiency measurements using correlated photons[J]. Metrologia, 1995, 32(6): 479-483.
- 15 Li Pingfu, Li Jianjun, Xia Maopeng, *et al.*. Numerical simulation and experiment of spectral distribution of type-I noncollinear spontaneous parametric down-conversion[J]. Journal of Atmospheric and Environment Optics, 2013, 8(3): 203-211.
- 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): 203-211.
- 16 C K Hong, L Mandel. Theory of parametric frequency down conversion of light[J]. Physical Review A, 1985, 31(4): 2409-2418.
- 17 Lu Zonggui, Liu Hongjun, Jing Feng, *et al.*. Theoretical analysis of spectral properties of parametric fluorescence via spontaneous parametric downconversion[J]. Acta Physics Sinica, 2009, 58(7): 4689-4696.
- 卢宗贵, 刘红军, 景峰, 等. 基于自发参量下转换产生参量荧光的光谱分布特性理论分析[J]. 物理学报, 2009, 58(7): 4689-4696.
- 18 F Devaux, E Lantz. Spatial and temporal properties of parametric fluorescence around degeneracy in type I LBO crystal [J]. Eur Phys J D, 2000, 8(1): 117-124.

栏目编辑: 刘丰瑞