

# 基于外部光反馈的双偏振光纤激光器 拍频相位噪声抑制

劳奕琴<sup>1</sup> 余颀琮<sup>2</sup> 程凌浩<sup>1</sup> 梁贻智<sup>1</sup> 梁 浩<sup>1</sup> 关柏鸥<sup>1</sup>

<sup>1</sup>暨南大学光子技术研究院, 广东 广州 510632

<sup>2</sup>北京交通大学计算机与信息技术学院信息科学研究所, 北京 100044

**摘要** 以光纤光栅作为反射镜, 将双偏振光纤激光器的一小部分输出光经光纤延迟线延迟后再反馈回激光腔, 降低了拍频信号的相位噪声。结果表明: 反馈时间越长, 噪声降低的幅度越大。以 50 m 长的单模光纤作为延迟线, 降低了双偏振光纤光栅激光器拍频信号 20 dB 以上的相位噪声, 在 10 kHz 偏移处相位噪声达到  $-92$  dBc/Hz 的水平; 光反馈的偏振态对外部光反馈系统的噪声抑制能力有影响, 并对双偏振光纤激光器的拍频频率有微弱的调谐能力。

**关键词** 激光器; 双偏振光纤激光器; 相位噪声; 降噪

**中图分类号** TN248

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201643.0601008

## Beat Frequency Phase Noise Suppression of Dual-Polarization Fiber Laser Based on External Optical Feedback

Lao Yiqin<sup>1</sup> Yu Kuanglu<sup>2</sup> Cheng Linghao<sup>1</sup> Liang Yizhi<sup>1</sup> Liang Hao<sup>1</sup> Guan Baiou<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

<sup>2</sup>Institute of Information Science, School of Computer and Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

**Abstract** By using a fiber grating as a reflector, a small part of the dual-polarization fiber laser is delayed by the fiber delay line, and then fed back to the laser cavity, which can reduce the phase noise of beat frequency. Results show that the longer the feedback time is, the greater the noise reduction magnitude is. With a 50 m single mode fiber as the delay line, more than 20 dB phase noise reduction is achieved for a dual-polarization fiber grating laser, and a phase noise of  $-92$  dBc/Hz at 10 kHz offset is achieved. The polarization state of optical feedback has influences on noise suppression capability of the external optical feedback system, and it has weak tuning capability to beat frequency of the dual-polarization fiber.

**Key words** lasers; dual-polarization fiber lasers; phase noise; noise reduction

**OCIS codes** 140.3425; 060.2370

## 1 引 言

双偏振光纤光栅激光器在光纤传感领域有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。由于激光腔内存在双折射, 这种光纤光栅激光器输出两束频率不同、偏振态正交的激光, 经光电探测后产生拍频信号, 其频率为两正交偏振激光的频率差。被传感的信号引起激光腔内双折射变化时, 拍频信号的频率也随之变化, 被传感信号的大小即可通过检测拍频信号的频率变化而测得。拍频信号被直接用于传感, 因此对于基于双偏振光纤光栅激光器的传感器, 其拍频信号的噪声性能对传感性能而言非常关键。

**收稿日期:** 2015-12-28; **收到修改稿日期:** 2016-03-09

**基金项目:** 国家自然科学基金(11474133, 61235005)、广东省自然科学基金团队项目(S2013030013302)

**作者简介:** 劳奕琴(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤通信、光纤传感方面的研究。E-mail: melissa\_118@163.com

**导师简介:** 程凌浩(1977—), 男, 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要从事光纤传感和光纤通信方面的研究。

E-mail: chenglh@ieee.org (通信联系人)

一般情况下,长腔光纤激光器具有较低的相位噪声<sup>[2]</sup>。然而,长腔光纤激光器会出现多纵模<sup>[3-5]</sup>,纵模之间的竞争使得拍频信号很不稳定。因此,支持单纵模的短腔光纤激光器在光纤传感领域更受欢迎。由于腔长较短,短腔光纤激光器通常表现出较大的相位噪声。短腔双偏振光纤激光器拍频信号的相位噪声典型值约为-60 dBc/Hz(10 kHz处),远高于激光器的背景热噪声水平。因此,短腔双偏振光纤激光器拍频信号的噪声水平有很大的下降空间。如果能抑制短腔光纤激光器的噪声,将实现更好的传感性能。

反馈是一种经常使用的稳定和抑制噪声的技术<sup>[6-11]</sup>。为抑制短腔光纤激光器的噪声,采用外部光反馈<sup>[12-16]</sup>是一种简单且易于实施的方法。将一部分激光输出反馈回激光腔中,当反馈的参数合适时可以实现对光纤激光器噪声的抑制。本文用一个与双偏振光纤激光器输出波长匹配的光纤光栅作为反射镜,并以一定长度的光纤延迟线<sup>[17-18]</sup>作为反馈时延,将双偏振光纤激光器的一小部分输出功率延迟一段时间后反馈回激光腔,实现了对拍频信号相位噪声的抑制。此外,研究还发现光反馈的偏振态对外部光反馈系统的噪声抑制能力有影响,并对双偏振光纤激光器的拍频频率有微弱的调谐能力。

## 2 实验与结果分析

图1显示了基于外部光反馈的双偏振光纤激光器拍频信号噪声抑制的基本方案。光纤激光器的部分输出经过一段光纤延迟线后,被激光器外的1个波长匹配的光纤布拉格光栅反射回激光腔,这部分被反射的激光输出在激光器一端的光栅处又被反射一部分能量,从而在外部光纤光栅和激光器一端的光栅之间形成多重反射。对于激光腔内部而言,由于外部光纤光栅的反射作用,其一端的光纤光栅反射镜变成了1个法布里-珀罗谐振腔,其反射率与频率相关且具有额外的相移。对于这样的1个外部光反馈系统,外部光纤光栅和光纤激光器一端的光纤光栅可以视为1个整体,其整体的透射率和反射率由艾里公式表示。引入外部光反馈给激光腔带来了额外的相移和增益,并且这种相移和增益是周期性的,其周期由光纤延迟线的长度确定。当光纤延迟线的长度较长时,周期变短,相移随频率有较快的变化率。因为某种原因激光器的相位发生突变引起相位噪声时,对于没有外部光反馈的光纤激光器会表现为较大的瞬时频率变化。而对于有外部光反馈的光纤激光器,只需要较小的1个瞬时频率变化,就可以由外部光反馈所带来的额外相移来补偿这个噪声所引起的相位变化,从而使得激光器在新的振荡频率上表现得更加稳定,具有更低的相位噪声。因此,如果尽可能地抑制激光器的相位噪声,应使外部光反馈所带来的相移随频率的变化率尽可能大,可以用较长的光纤延迟线缩短周期来实现。

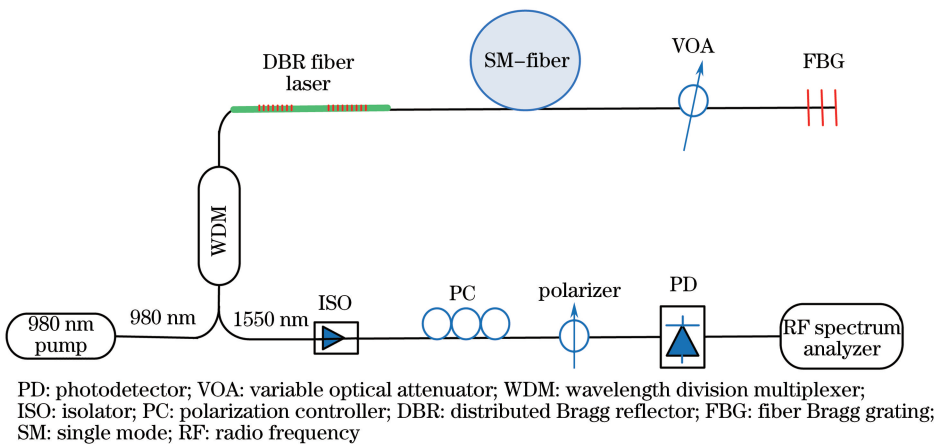


图1 外部光反馈双偏振光纤激光器拍频信号噪声抑制系统实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of beat frequency signal noise suppression system of dual-polarization fiber laser by external optical feedback

图1中,双偏振光纤激光器由1对刻写在掺铒光纤上的光纤布拉格光栅(FBG)所形成的分布布拉格反射(DBR)光纤激光器构成。两边光栅长度分别为6 mm和5 mm,最大反射率分别为30 dB和27 dB,2个光栅之间的间距为5 mm。激光器由1个980 nm的抽运激光器抽运,输出波长为1534 nm的单纵模激光。激

光器一端的输出由 1 个 980 nm/1550 nm 的波分复用器(WDM)滤出,经过光隔离器(ISO)、偏振控制器(PC)和起偏器后,经光电探测器光电转换后输出拍频信号。由于激光腔内固有的双折射,光纤激光器的单纵模输出包含 2 个偏振态正交的输出,其频率差正比于激光腔内的双折射,即

$$\Delta\nu = \frac{c}{n_0\lambda_0}B, \quad (1)$$

式中  $\Delta\nu$  为 2 个正交偏振态输出的频率差, $B$  为激光谐振腔内的双折射, $n_0$  是光纤激光器的平均折射率, $\lambda_0$  是输出激光的波长, $c$  是真空中光速。实验中,光纤激光器的输出经过光电检测器后产生了 1 个频率约为 344 MHz 的拍频信号,该拍频信号经由 1 个射频频谱分析仪进行监测和分析。

激光器的另一端输出则用来实现外部光反馈以抑制拍频信号的噪声,一定长度的单模光纤延迟线被熔接在激光器的这一端上。在光纤延迟线的另一端则依次熔接上 1 个可变光衰减器和 1 个光纤光栅。光纤光栅的中心反射波长与激光器输出波长匹配,并具有 33 dB 的反射率。可变光衰减器用来控制外部光反馈的强弱,通过一个单模光纤延迟线被另一个光纤光栅反射回激光腔。通常情况下,外部光反馈强度应尽可能高,使得由光纤激光器一端的光栅和腔外的光栅所构成的外腔具有更高的品质因数。此时,外腔所引入的额外相位补偿会随着频率变化而有更快的变化速率,带来更好的噪声抑制效果。但是,外部光反馈的强度如果过强,激光器会趋向于外腔注入的工作模式,导致激光器工作在外腔模式的频率而偏离了激光器本身的工作频率。因此,实验中光可变衰减器经过了细致调谐,使得激光器工作在最大的噪声抑制水平,同时又没有外腔模式振荡出现。

实验中分别测量了接入 10、17、30、50 m 长的单模光纤延迟线后所获得拍频信号的相位噪声,图 2 显示了测量结果;对无外部光反馈时的拍频信号相位噪声也进行了测量,并显示在图 2 中作为对比。可以看到:由光纤延迟线和光纤光栅反射镜构成的外部光反馈系统有效抑制了拍频信号的相位噪声。10 m 长的光纤延迟线可以抑制噪声约 10 dB,更长的光纤延迟线可以达到更高的抑制效果,但同时噪声抑制能力也随光纤延迟线的延长而趋于平缓。当光纤长度达到使外腔模式的频率接近甚至小于激光器弛豫振荡模式的频率时,外部反馈所带来的相位噪声抑制将失去作用<sup>[12,16]</sup>。因此,也不能通过无限增长延迟光纤长度来提升抑制水平。另外,图 2 也显示出外部光反馈在低频范围内的噪声抑制更有效,而随着噪声频率的升高,噪声抑制能力逐渐趋于饱和水平,这可能取决于背景的热噪声水平。图 3 显示了接入各种不同长度外部光纤延迟线时噪声性能的改善情况。可以看出:外部光纤延迟线的长度越长,噪声性能的改善越明显。一段 50 m 左右长度的延迟线可以将相位噪声抑制约 22 dB,在 10 kHz 的频率偏移处将相位噪声从约 -70 dBc/Hz 的水平抑制到约 -92 dBc/Hz 的水平。相位噪声的抑制也提升了激光器对环境扰动的抗干扰能力,表现为激光器输出拍频信号频率稳定性获得显著改善。

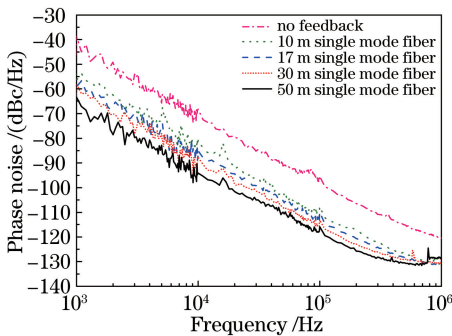


图 2 采用不同长度的光纤延迟线所测得的双偏振光纤激光器拍频信号相位噪声

Fig. 2 Measured beat frequency signal phase noise of dual-polarization fiber laser using fiber delay lines with different lengths

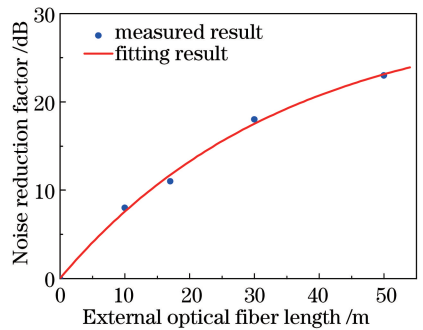


图 3 采用不同长度光纤延迟线测得的噪声抑制水平  
Fig. 3 Measured noise suppression using fiber delay lines with different lengths

双偏振光纤激光器输出的是具有 2 个正交偏振态的双频激光,反馈回激光腔的光信号的偏振态<sup>[19-21]</sup>也会对拍频信号的噪声抑制特性产生重要影响。为了研究反馈光信号偏振态的影响,对图 1 所示的实验系统

进行了改进。如图 4 所示,用光环行器代替光纤光栅来实现外部光反馈,同时在环形器构成的环路内引入 1 个可旋转的半波片来旋转反馈光信号的偏振面。在环形器与光纤激光器之间插入另外 1 个 980 nm/1550 nm 的波分复用器,将 980 nm 激光旁路。在环形器构成的环路内接入一段 50 m 长的单模光纤作为反馈延迟。初始半波片的旋转角度为  $90^\circ$ ,拍频频率为 358.5 MHz,此时调整环路内的可变光衰减器实现最优的相位噪声抑制。在此情况下,旋转半波片,调整反馈光信号的偏振面角度,可以看到拍频信号的频率随着半波片的旋转而移动,结果如图 5 所示。拍频频率的移动与半波片旋转角度的关系则如图 6 所示。这表明:当施加外部光反馈后,激光器新的振荡频率较原来没有反馈时的频率会发生一定的偏移,并且这个偏移量与反馈回来的光信号的偏振态有密切关系。需要注意的是,图 6 所示的只是半波片旋转了总共大约  $56^\circ$  时的结果。由于偏振面的旋转是半波片旋转角度的 2 倍,实验中偏振面旋转了  $112^\circ$ ,在这  $112^\circ$  范围内,激光器处于稳定的状态;而当半波片的角度处于这  $112^\circ$  范围之外的其他角度时,激光器处于不稳定状态。因此,反馈光的偏振态对外部光反馈的噪声抑制能力有重要影响。在理想情况下,当反馈光的偏振态与激光器输出偏振态一致,外部光反馈的噪声抑制能力最为理想。而当反馈光的偏振面相对于激光器输出偏振面旋转了  $90^\circ$ ,反馈回来的光信号与激光腔内的光信号偏振态正好正交,使反馈的光信号并不满足激光器的谐振条件,导致激光器工作不稳定,反而不利于噪声的抑制。能保证激光器稳定工作的反馈光偏振面角度有一个适用的范围,这与实验现象一致。

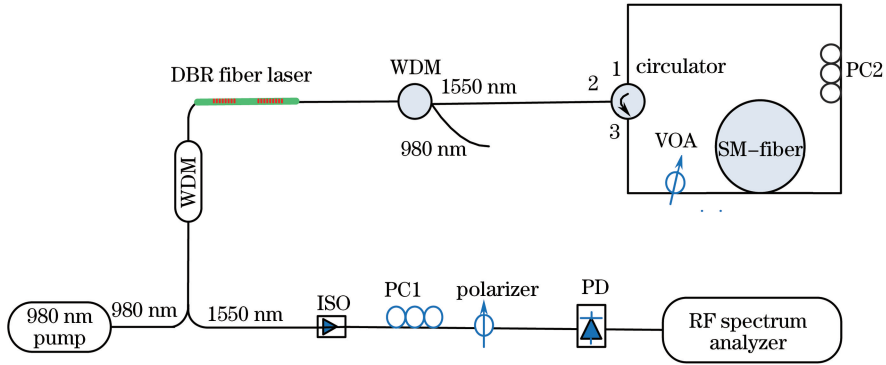


图 4 反馈光信号偏振态对双偏振光纤激光器拍频信号影响实验装置图

Fig. 4 Experimental setup to investigate the influence of feedback optical signal polarization state on beat frequency signal of dual-polarization fiber laser

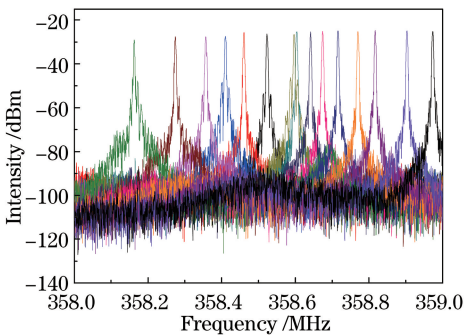


图 5 旋转反馈光信号偏振面测得的拍频信号

Fig. 5 Measured beat note signals by rotating the feedback optical signal polarization plane

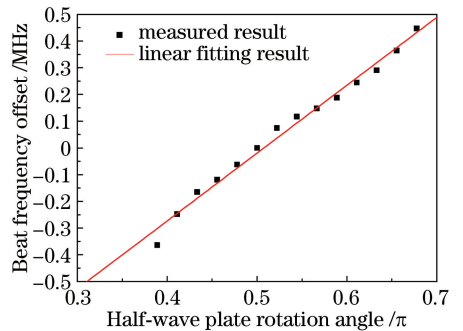


图 6 半波片旋转角度与测量得到的拍频频率偏移量

Fig. 6 Measured beat frequency offset versus rotation angle of the half-wave plate

### 3 结 论

通过外部光反馈把部分激光反射回双偏振光纤激光器,可以有效抑制双偏振光纤激光器的拍频噪声。通过实验分析表明:外部光反馈系统的噪声抑制能力依赖于外部光纤延迟线的长度,延迟线的长度越长,噪声的抑制能力越强。以一段 50 m 长的单模光纤作为延迟线,在实验中将双偏振光纤激光器的相位噪声降

低了 20 dB 以上。在频率为 10 kHz 的偏移处,将相位噪声从约  $-70$  dBc/Hz 抑制到约  $-92$  dBc/Hz 的水平。外部反馈回激光腔的光信号的偏振态对拍频噪声的抑制也有重要影响。外部光反馈系统需要保证反馈光信号偏振面相对激光器输出偏振面的旋转角度小于一定范围才能实现稳定的拍频噪声抑制。

## 参 考 文 献

- 1 Guan Baiou, Jin Long, Zhang Yang, *et al.*. Polarimetric heterodyning fiber grating laser sensors [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(8): 1097-1112.
- 2 Ye Jiaxiang. Phase noise of single mode semiconductor lasers [J]. Chinese J Lasers, 1987, 14(9): 562-565.  
叶嘉雄. 单模半导体激光器的相位噪声 [J]. 中国激光, 1987, 14(9): 562-565.
- 3 Lu Bingsong. Study on teaching of analysis test in laser model [J]. Journal of Fuyang Teachers College, 1993, 29(3): 89-91.  
卢秉嵩. 激光器模式分析实验教学探讨 [J]. 阜阳师范学院学报, 1993, 29(3): 89-91.
- 4 Chen Gang, Wei Gaoyao. Measurement of the frequency characteristics of longitudinal and transverse modes in He-Ne lasers [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2010, 29(6): 33-36.  
陈 刚, 魏高尧. He-Ne 激光器纵横模频率特性的实验测量 [J]. 实验室研究与探索, 2010, 29(6): 33-36.
- 5 Liu Shengchun, Gu Rong, Gao Liang, *et al.*. Multi-longitudinal mode fiber-ring laser sensor for strain measurement [J]. Optical Engineering, 2011, 50(5): 054401.
- 6 Yuan Dandan, Hu Shuling, Liu Honghai, *et al.*. Research of laser frequency stabilization [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(8): 081401.  
苑丹丹, 胡姝玲, 刘宏海, 等. 激光器稳频技术研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(8): 081401.
- 7 Yu Benli, Qian Jingren, Luo Jiatong, *et al.*. Stable single-frequency fiber ring laser with linewidth less than 0.5 kHz [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2001, 18(4): 345-348.  
俞本立, 钱景仁, 罗家童, 等. 线宽小于 0.5 kHz 稳态的单频光纤环形腔激光器 [J]. 量子电子学报, 2001, 18(4): 345-348.
- 8 Massey G A, Oshman M K, Targ R. Generation of single-frequency light using the FM Laser [J]. Applied Physics Letters, 1995, 6(1): 10-11.
- 9 Jin Jie, Guo Shuguang, Wang Hongjie, *et al.*. External cavity diode laser at 1.5  $\mu\text{m}$  with saturated absorption frequency stabilization [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2000, 37(3): 13-18.  
金 杰, 郭曙光, 王宏杰, 等. 1.5  $\mu\text{m}$  波段饱和吸收稳频外腔半导体激光器 [J]. 激光与光电子学进展, 2000, 37(3): 13-18.
- 10 Rønnekleiv E. Frequency and intensity noise of single frequency fiber Bragg grating lasers [J]. Optical Fiber Technology, 2001, 7(3): 206-235.
- 11 Tikhomirov A, Foster S. DFB FL sensor cross-talk coupling reduction [J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(2): 533-538.
- 12 Lang R, Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties [J]. Quantum Electronics, 1980, 16(3): 347-355.
- 13 Schunk N, Petermann K. Numerical analysis of the feedback regimes for a single-mode semiconductor laser with external feedback [J]. Quantum Electronics, 1988, 24(7): 1242-1247.
- 14 Olesen H, Osmundsen J H, Tromborg B. Nonlinear dynamics and spectral behavior for an external cavity laser [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1986, 22(6): 762-773.
- 15 Kanada T, Nawata K. Injection laser characteristics due to reflected optical power [J]. Quantum Electronics, 1979, 15(7): 559-565.
- 16 Liang Y, Jin L, Cheng L, *et al.*. Stabilization of microwave signal generated by a dual-polarization DBR fiber laser via optical feedback [J]. Optics Express, 2014, 22(24): 29356-29362.
- 17 Zhang Chunxi, Zhang Xiaoqing. Development of application research on fiber delay lines [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(9): 2234-2244.  
张春熹, 张晓青. 光纤延迟线应用研究动态 [J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2234-2244.
- 18 Du Shu, Chen Fushen. Research on continuously tunable optical delay line [J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2007, 41(1): 39-43.  
杜 书, 陈福深. 连续可调光延迟线技术研究 [J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2007, 41(1): 39-43.

- 19 Dong Juan, Li Yanqiu. Effect of assembly and manufacturing error for wide-viewing-angle quarter waveplate on polarimetry[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0612006.  
董 娟, 李艳秋. 宽视场角 1/4 波片装调和加工误差对偏振检测的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0612006.
- 20 Wang Chunhua, Li Li, Peng Lei, *et al.*. Polarization dynamics of an SOA-based fiber ring with polarization feedback[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0614003.  
王春华, 李 力, 彭 蕾, 等. 基于偏振反馈的半导体光放大器光纤环的动态偏振响应[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0614003.
- 21 Wang Chao, Jiang Lun, Dong Keyan, *et al.*. Analysis of the polarization characteristic of a satellite-to-ground laser communication optical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(12): 120607.  
王 超, 江 伦, 董科研, 等. 星地激光通信系统偏振特性分析[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(12): 120607.