

文章编号: 0253-2239(2005)05-614-5

三波片偏振态变换器误差分析*

王军利¹ 方强² 王永昌¹ 阴亚芳² 刘毓²

(¹ 西安交通大学现代物理研究所, 西安 710049)
(² 西安邮电学院电信系, 西安 710061)

摘要: 在相干光通信和高速光纤通信等领域,要求偏振变换器具有高的偏振变换精度。对由两个可独立旋转的 $\lambda/4$ 波片和一个可独立旋转的 $\lambda/2$ 波片组成的三波片偏振变换器的偏振变换误差进行了详细的分析。利用二维几何方法推导出了由波片方位角误差造成的偏振变换误差模型,并进行了数值计算。研究表明,三波片不同的组合方式对偏振态的变换精度有影响。其中, $\lambda/4+\lambda/2+\lambda/4$ 组合具有最高的偏振变换精度, $\lambda/2+\lambda/4+\lambda/4$ 次之, $\lambda/4+\lambda/4+\lambda/2$ 的最差;经三种偏振变换器变换后偏振态的方位角的变换误差较大,变换后偏振态的椭圆率的误差很小;三种偏振变换器都可以实现较高精度的任意偏振态变换。

关键词: 光纤通信技术; 偏振态变换器; 误差分析; 波片

中图分类号: O436.3; TN929.11 文献标识码: A

Error Analysis on Three-Waveplate Polarization State Transformers

Wang Junli¹ Fang Qiang² Wang Yongchang¹ Yin Yafang² Liu Yu²

(¹ Institute of Modern Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049)
(² Department of Telecommunications, Xi'an Institute of Posts and Telecommunications, Xi'an 710061)

Abstract: The polarization transform errors of three-waveplate polarization transformers (TWPTs), which consist of one half-waveplate ($\lambda/2$) and two quarter-waveplates ($\lambda/4$), are discussed detail. The error models of the TWPT using a new and simple two dimensions geometry method instead of traditional Poincaré sphere method are deduced and numerically calculated. The results of investigation show that the errors of the TWPTs are dependent on the different combinations of one $\lambda/2$ and two $\lambda/4$, and according to the accuracy of TWPTs, $\lambda/4+\lambda/2+\lambda/4$ is the best, $\lambda/2+\lambda/4+\lambda/4$ is better and $\lambda/4+\lambda/4+\lambda/2$ is good. After polarization transform, the errors of azimuth angle and ellipticity angle are rather large and minor respectively and the TWPTs have enough accuracy to meet the applications in the field of coherent optical communications and optical fiber communication systems.

Key words: optical fiber communications technology; polarization state transformers; error analysis; waveplates

1 引 言

三波片偏振变换器所有结构为 $\lambda/4+\lambda/2+\lambda/4$ (QH_Q), $\lambda/2+\lambda/4+\lambda/4$ (HQ_Q)和 $\lambda/4+\lambda/4+\lambda/2$ (QQH)三种组合形式^[1,2]。在光纤传感,高速光纤通信系统中它们用于偏振模色散的补偿^[3~5]。作为对光信号偏振态进行变换的光器件,要求偏振变换器具有高的变换精度。在研究三波片偏振变换器的偏振变换问题的方法中,矩阵方法(琼斯矩阵或者斯

托克斯矩阵方法)虽然是最容易想到的方法,它在组成变换器的波片数目少的情况下可以迅速得到问题的解,但是当变换器中波片数目超过两个的时候会复杂化偏振变换问题的求解。二维几何研究方法在变换单元数目增大的情况下仍然可以简化处理有关偏振变换的问题,同时又不失处理问题的准确性^[2]。由于二维几何方法处理偏振变换问题的简便性,我们采用该方法对三波片型偏振变换器的偏振变换误

* 国家“十五”科技攻关项目(2002BA106B07-5)资助课题。

作者简介: 王军利(1976~),男,西安交通大学电信学院博士研究生,主要从事高速光纤通信系统中偏振效应的研究。

E-mail: wjl_lb@163.com

收稿日期: 2004-09-22; 收到修改稿日期: 2004-11-26

差进行分析。关于对三波片型偏振变换器进行偏振变换误差分析的文献未曾报道。本文对影响偏振变换器偏振变换精度的主要因素之一波片快轴的方位角(以后简称为波片方位角)误差进行了分析,并建立了相应的误差模型。通过数值计算得到了它们对偏振变换器变换精度的影响大小,并且对三种三波片偏振变换器的精度进行了比较。本文的结构如下:1)研究三波片偏振变换器中波片方位角误差对偏振变换误差的影响,建立相应的误差模型,并进行数值计算。2)研究波片方位角误差对偏振变换器误差的影响大小,得到三种波片偏振变换器精度的比较。3)给出本文的研究结果,用于指导偏振变换器的优化设计。

2 波片方位角引入的偏振变化误差模型

2.1 QHQ 型三波片偏振变换器的偏振变换误差分析

偏振变换器在实际使用过程中由于器件装配,光源的非严格单色性以及波片方位角都会引入误差,导致最后变换的偏振态偏离我们所需要的偏振态。在光源单色性很好的情况下,波片方位角误差对偏振变换器的影响是最主要的,本文就波片方位角误差引入的偏振变换误差进行分析。首先利用偏振态投射面以 QHQ 型三波片偏振变换器为例进行误差分析,并推导出相应的误差模型。图 1 给出了 QHQ 型三波片偏振变换系统中波片方位角偏离其精确位置时,对系统偏振变换精度的影响。

在斯托克斯空间,表征偏振光的偏振态的基本物理参量为偏振椭圆长轴的方位角 2θ 和偏振椭圆的椭

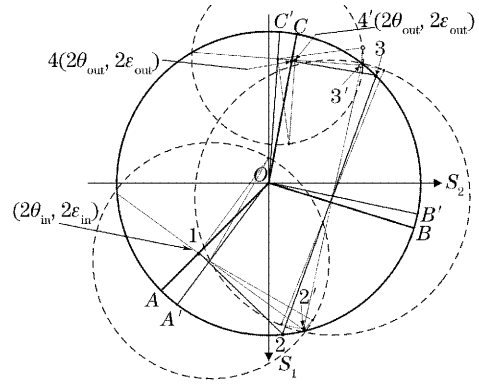


图 1 波片方位角误差引入的 QHQ 偏振态变换误差
Fig. 1 The Polarization transforming error of QHQ induced by azimuth angle of three waveplates

圆率 2ϵ ,任何偏振态都可以表示为 $SOP(2\theta, 2\epsilon)^{[7]}$ 。图 1 中,点 1 和点 4 代表精确偏振变换时初始和最终的偏振态,表征它们偏振态的物理参量分别为 $SOP1(2\theta_{in}, 2\epsilon_{in})$ 和 $SOP4(2\theta_{out}, 2\epsilon_{out})$ 。 $SOP2(2\theta_2, 2\epsilon_2)$ 和 $SOP3(2\theta_3, 2\epsilon_3)$ 分别代表精确偏振变换时的中间偏振态。 $SOP2'(2\theta', 2\epsilon'_2)$ 、 $SOP3'(2\theta'_3, 2\epsilon'_3)$ 和 $SOP4'(2\theta'_{out}, 2\epsilon'_{out})$ 分别代表波片快轴方位角偏离精确位置时,偏振变换变换的中间偏振态和最终的偏振态。第一个 $\lambda/4$ 波片、中间的 $\lambda/2$ 波片和第三个 $\lambda/4$ 波片的波片方位角精确位置分别为 OA, OB 和 OC 。当波片方位角偏离精确位置时,它们的位置分别为 OA', OB' 和 OC' 。 $\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma$ 分别是第一个 $\lambda/4$ 波片、中间的 $\lambda/2$ 和第三个 $\lambda/4$ 波片的方位角误差,在图 1 中分别对应为 $\angle AOA' = \Delta\alpha, \angle BOB' = \Delta\beta, \angle COC' = \Delta\gamma$ 。在偏振态投射平面内,经过几何变换我们可以得到下列结果:

$$SOP1(2\theta_{in}, 2\epsilon_{in}),$$

$$SOP2(2\theta_{in} + 2\epsilon_{in}, 0), \quad SOP2' \left[2\theta_{in} + \Delta\alpha + \arctan \left(\frac{\tan 2\epsilon_{in}}{\cos \Delta\alpha} \right), \arccos(\cos^2 \Delta\alpha \cos^2 2\epsilon_{in} + \sin^2 2\epsilon_{in})^{1/2} \right],$$

$$SOP3(2\theta_{out} - 2\epsilon_{out}, 0),$$

$$SOP3' \left[2\theta_{out} - 2\epsilon_{out} - \Delta\alpha - \arctan \left(\frac{\tan 2\epsilon_{in}}{\cos \Delta\alpha} \right) + 2\epsilon_{in} + 2\Delta\beta, -\arccos(\cos^2 \Delta\alpha \cos^2 2\epsilon_{in} + \sin^2 2\epsilon_{in})^{1/2} \right],$$

$$SOP4(2\theta_{out}, 2\epsilon_{out}),$$

$$SOP4' \left\{ 2\theta_{out} - \Delta\gamma - \arctan \left[\frac{\tan 2\epsilon'_3}{\cos(2\theta_{out} + \Delta\gamma - 2\theta'_3)} \right], \arccos[\cos^2(2\theta_{out} + \Delta\gamma - 2\theta'_3) \cos^2 2\epsilon'_3 + \sin^2 2\epsilon'_3]^{1/2} \right\},$$

SOP1 和 SOP4 分别是初始和最终的偏振态。其中

$$2\theta'_3 = 2\theta_{out} - 2\epsilon_{out} - \Delta\alpha - \arctan \left(\frac{\tan 2\epsilon_{in}}{\cos \Delta\alpha} \right) + 2\epsilon_{in} + 2\Delta\beta, \quad (1)$$

$$2\epsilon'_3 = -\arccos(\cos^2 \Delta\alpha \cos^2 2\epsilon_{in} + \sin^2 2\epsilon_{in})^{1/2}, \quad (2)$$

是波片方位角偏离精确位置时, $SOP3'$ 的偏振态。由上面的偏振态我们可以得到最后的偏振变换误差为

$$2\Delta\theta = 2\theta'_2 - 2\theta_2 = \Delta\gamma + \arctan\left[\frac{\tan 2\epsilon'_3}{\cos(2\theta_{out} + \Delta\gamma - 2\theta'_3)}\right], \quad (3a)$$

$$2\Delta\epsilon = 2\epsilon'_{out} - 2\epsilon_{out} = \arccos[\cos^2(2\theta_{out} + \Delta\gamma - 2\theta'_3)\cos^2 2\epsilon'_3 + \sin^2 2\epsilon'_3]^{1/2} - 2\epsilon_{out}. \quad (3b)$$

同理,使用上面的推导方法可以获得 HQQ 型三波片偏振变换器的误差模型:

$$2\Delta\theta = \Delta\gamma + \arctan\left\{\frac{\sin(2\Delta\beta - \Delta\alpha)\cos 2\epsilon_{in}}{\cos[2\epsilon_{in} + 2\epsilon_{out} - \Delta\alpha - \arctan[\tan 2\epsilon_{in}/\cos(2\Delta\beta - \Delta\alpha)] + \Delta\gamma]}\right\}, \quad (4a)$$

$$2\Delta\epsilon = \arccos\left\{\cos^2\left[2\epsilon_{in} + 2\epsilon_{out} - \Delta\alpha - \arctan\left(\frac{\tan 2\epsilon_{in}}{\cos(2\Delta\beta - \Delta\alpha)}\right) + \Delta\gamma\right] + \sin^2(2\Delta\beta - \Delta\alpha)\cos^2 2\epsilon_{in}\right\}^{1/2} - 2\epsilon_{out}, \quad (4b)$$

和 QQH 型三波片偏振变换器的误差模型:

$$2\Delta\theta = 2\Delta\beta - \Delta\gamma - \arctan\left(\frac{\tan B}{\cos C}\right), \quad (5a)$$

$$2\Delta\epsilon = \arccos\{\cos^2[2\epsilon_{in} + 2\epsilon_{out} + 2\theta_{in} - A + \Delta\gamma]\cos^2 B + \sin^2 B\}^{1/2} - 2\epsilon_{out}, \quad (5b)$$

在(5a)式和(5b)式中,

$$A = 2\theta_{in} + \Delta\alpha + \arctan\left(\frac{\tan 2\epsilon_{in}}{\cos \Delta\alpha}\right);$$

$$B = \arccos[1 - (\sin \Delta\alpha \cdot \cos 2\epsilon_{in})^2]^{1/2},$$

$$C = 2\epsilon_{in} + 2\epsilon_{out} + 2\theta_{in} - A + \Delta\gamma.$$

3 数值计算结果及分析

我们选取两个已知偏振态 $SOP_{in}(30^\circ, 45^\circ)$, $SOP_{out}(135^\circ, 22.5^\circ)$ 分别表示经过偏振变换器变换

之前和之后的偏振态进行分析。同时,设 $\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma$ 是正态分布的连续随机变量,它们的均值和方差都分别为 0 和 0.005。利用(3)式~(5)式,通过 10000 次计算得到图 2~图 4。图 2~图 4 分别表示了三种偏振变换器中,每个波片的方位角误差对总的偏振变换误差的影响。图中的纵坐标表示偏振态的变换误差,横坐标表示波片的方位角误差,单位均为弧度。

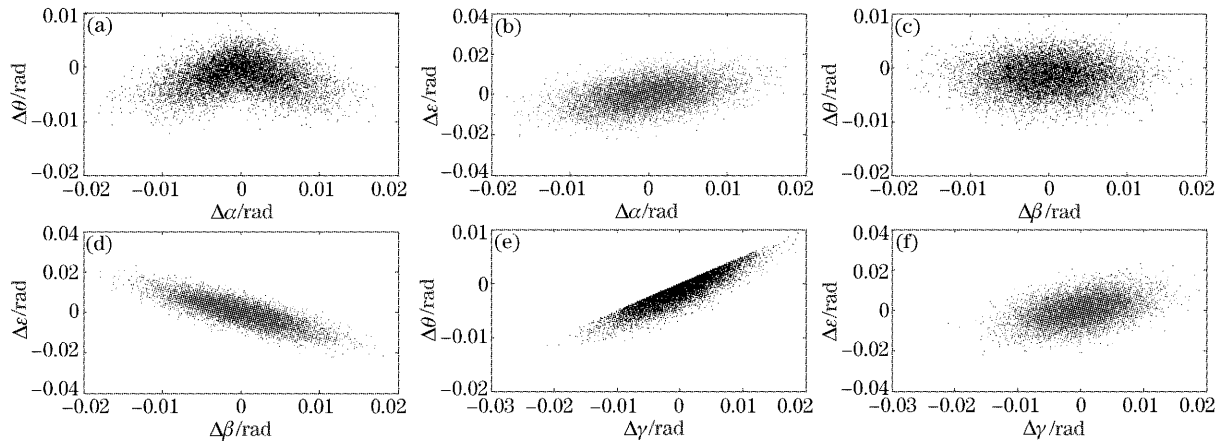


图 2 QHQ 型变换器波片位置误差随机变化时对偏振变换精度的影响

Fig. 2 The impact of random position error of single waveplate on polarization transforming error in QHQ

由图 2 可知,第一个 $\lambda/4$ 波片和第二个 $\lambda/4$ 对变换器误差的影响类似,即 $\Delta\theta$ 和 $\Delta\epsilon$ 都随着 $\Delta\alpha$ 和 $\Delta\gamma$ 的增大而增大,但是值得注意的是位于两个 $\lambda/4$ 波片中间的 $\lambda/2$ 波片的方位角误差 $\Delta\beta$ 的增大对变换后偏振态的方位角产生的影响并不大。从图 2 中还可以看到,尽管单个波片对变换器的影响较大,但是它们叠加以后却使得整个变换器的误差得到一定程度的消除,这在数值计算结果的表 1 中可以看到,表 1 中 QHQ 型偏振变换器的均值很小,它的标准

偏差数值也较小。观察图 2~图 4,我们发现不管是哪种类型的偏振变换器,其处于中间的波片对表征偏振变换器的误差的两个量 $\Delta\theta$ 和 $\Delta\epsilon$ 之一始终有最小的影响。从以上三种偏振变换器的误差图中我们可以看到减小每个波片的方位角误差可以直接提高偏振变换器的精度。同时,在每个波片的方位角误差存在时,应该存在一个最佳的误差组合使得偏振变换器的误差达到最小。

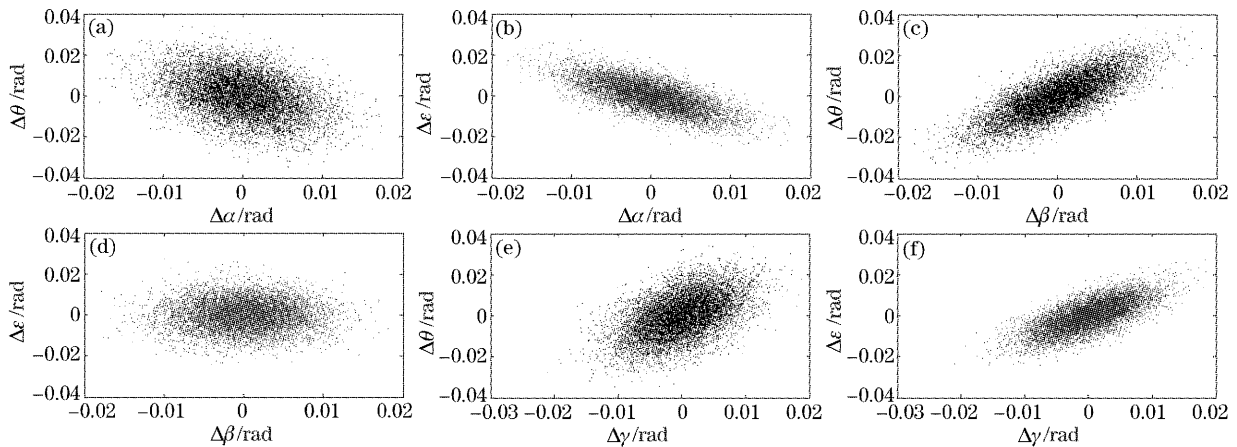


图 3 HQQ 型变换器波片方位角误差随机变化时对偏振变换精度的影响

Fig. 3 The impact of random position error of single waveplate on polarization transforming error in HQQ

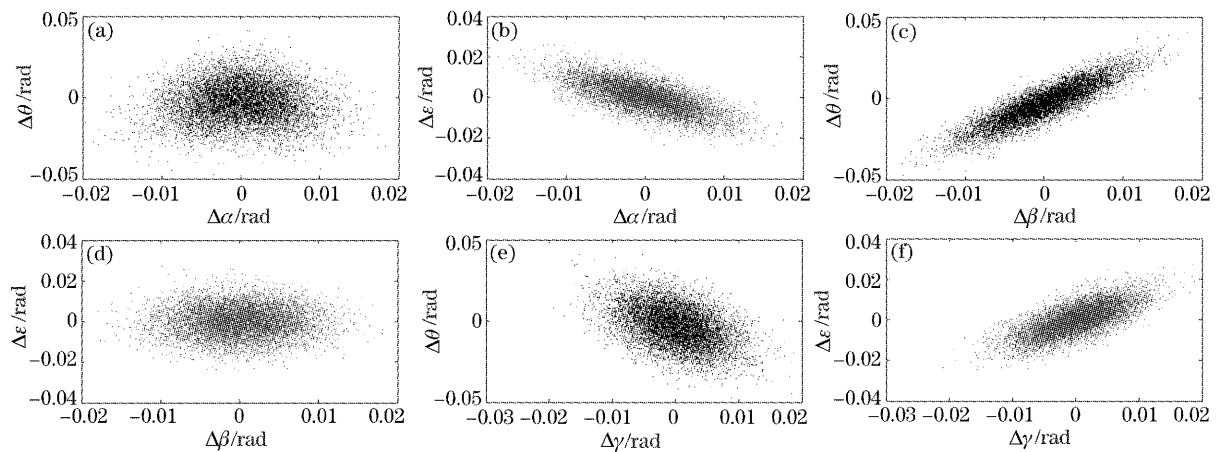


图 4 QQH 型变换器波片方位角误差随机变化时对偏振变换精度的影响

Fig. 4 The impact of random position error of single waveplate on polarization transforming error in QQH

表 1 是利用 (3) 式 ~ (5) 式的误差模型通过 10000 次计算得到的三种类型偏振变换器误差的统计结果^[6]。表 1 中分别给出了它们的均值 (Mean) 和标准差 (Std) 的数值,为了更好的比较三种偏振变换器的精度优劣,表 1 最后一列给出了和在给定误差范围内的概率值。分析表 1 数据我们发现:1) QHQ 和 HQQ 型偏振变换器的和的均值和标准差

都要小于 QQH 型的均值和标准差,但是它们在给定误差范围内的概率值都大于 QQH 型偏振变换器;2) QHQ 和 HQQ 型偏振变换器的和的均值互有优劣,但是前者误差的标准差均小于后者,重要的是前者在给定的误差范围内的概率值大于后者的相应值;3) 经三种类型的偏振变换器变换后的偏振态,其椭圆角误差都很小,但是方位角误差较大。

表 1 三种波片组合型偏振变换器的误差统计数据比较

Table 1 The static analysis of error data for three types of waveplate polarization transformers

	QHQ		HQQ		QQH	
	$\Delta\theta$	$\Delta\epsilon$	$\Delta\theta$	$\Delta\epsilon$	$\Delta\theta$	$\Delta\epsilon$
Mean	0.0860	5.53×10^{-4}	4.10×10^{-2}	8.82×10^{-3}	0.1719	2.76×10^{-3}
Std	0.1547	0.3554	0.5675	0.4013	0.6535	0.4127
$P[-0.2865^\circ, 0.2865^\circ]$	0.8888	0.5818	0.3877	0.5247	0.3273	0.5120

4 结 论

本文利用二维几何方法推导出了三波片型偏振变换器由于波片位置误差引起的偏振变换器的偏振

变换误差模型。通过数值计算得到三种偏振变换器的误差的统计数据。结果表明:1) QHQ、HQQ 和 QQH 型偏振变换器可以实现较高精度的偏振态变

换;2) 三种偏振变换器的变换精度由高到低依次为:QHQ,HQQ,QQH;3) 偏振变换器输出偏振态的椭圆率角受波片方位角误差影响很小,输出偏振态的方位角受波片方位角误差影响较大。

参 考 文 献

- 1 Yao Yi, Shi Kun, Lu Weidong *et al.*. In-line single mode fiber polarization controller [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15** (5): 636~640 (in Chinese)
姚毅,施昆,路伟东等. 在线单模光纤偏振控制器研究[J]. *光学学报*, 1995, **15**(5): 636~640
- 2 Wang Junli, Fang Qiang, Wang Yongchang *et al.*. Novel polarization transformer using rotatable waveplates [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(1): 21~26 (in Chinese)
王军利,方强,王永昌等. 利用旋转波片组实现偏振变换器的

两种新方法[J]. *光学学报*, 2005, **25**(1): 21~26

- 3 S. Lanne, W. Idler, J.-P. Thiery *et al.*. Fully automatic PMD compensation at 40Gbit/s [J]. *Electron. Lett.*, 2002, **38** (1): 40~41
- 4 Henning Bulow. PMD mitigation techniques and their effectiveness in installed fiber[C]. *OFC*, Baltimore, USA, 2000. ThH1~2
- 5 Takashi Ono, Shuntaro Yamazaki, Haruhito Shimizu *et al.*. Polarization control method for suppressing polarization mode dispersion influence in optical transmission systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(5): 891~898
- 6 Pu Jun, Ji Jiafeng, Yin Liangzhong. *MATLAB6.0 Mathematics Handbook* [M]. Shanghai: Pudong Electronics Press, 2002. 134~157 (in Chinese)
蒲俊,吉家锋,伊良忠. *MATLAB6.0 数学手册*[M]. 上海: 浦东电子出版社, 2002. 134~157
- 7 R. M. A. Azzam, N. M. Bashara. *Ellipsometry and Polarized Light* [M]. New York: North-Holland Publishing Co., 1977. 29

(上接封四)

3.7 参考文献 参考文献应是公开出版物,以便审者、编者、读者查证。文后参考文献以 GB/T 7714-1987 顺序编码制列出,每条内容应包括:作者(或译者,论文集编者,多于3人者用等或 et al.),文题,期刊名(或书名,会议名),出版年、卷、期(书或会议文集应相应列出版次、出版地、出版者、出版年、会议地点时间),起止页码。专利需列出专利性质及专利号。引用的网上出版物必须是固定的、可一直查阅的文献。中文参考文献应分别用中英文写出所有项目,并都须加上参考文献类型的标识:

参考文献类型	期刊	专著	论文集	学位论文	标准	专利	报告	报纸
文献类型标识	J	M	C	D	S	P	R	B

具体格式实例如下:

(1) 期刊:

Zhang Juan, Liu Liren, Zhou Yu *et al.*. Design of a new type interleaver[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1424~1428 (in Chinese)
张娟,刘立人,周煜等. 一种新型的光交错复用器的设计[J]. *光学学报*, 2003, **23**(12): 1424~1428

(2) 专著:

Jin Guofan, Li Jingzhen. *Laser Metrology*[M]. Beijing: Science Press, 1998, 162~165 (in Chinese)
金国藩,李景镇. *激光测量学*[M]. 北京:科学出版社, 1998. 162~165

(3) 译著:

Born M, Wolf E. *Principles of Optics*[M]. Yang Jiasun Transl. Beijing: Science Press, 1978. 182~190 (in Chinese)
玻恩,沃尔夫. *光学原理*[M]. 杨葭孙译. 北京:科学出版社, 1978. 182~190

(4) 学位论文:

Zhang Jing. *LD Sensor for Weak Vibration Measurement and its Application in Muscle Vibration Measurement* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2000, 21~30 (in Chinese)

张景. *激光二极管微振动传感器及其在肌肉振颤测量中的应用*[D]. 武汉:华中科技大学, 2000. 21~30

(5) 技术标准:

National Standardization Technical Committee. GB 3100~3102-93. *Quantities and Units* GB3100~3102-93[S]. Beijing: China Standard Press, 1994

国家标准化技术委员会. *量和单位* GB3100~3102-93[S]. 北京:中国标准出版社, 1994

为了避免漏引,并扩大您的论文及《光学学报》、《中国激光》、《Chinese Optics Letters》等中国光学类期刊的国际、国内影响,希望增引您自己和同行近二年在《光学学报》、《中国激光》、《Chinese Optics Letters》等中国光学类期刊上发表的文章作为参考文献。

3.8 基金项目: 所投文章项目受到资助的,应标明资助名称及批准号。

作者简介: 姓名(出生年~),性别,民族(汉族可省),籍贯,职称,学历,从事专业。E-mail(少于60字)

3.9 投寄要求 为了加速期刊的电子化、网络化,加快稿件处理速度,一律采用 E-mail 投稿。稿件需附一份显示来稿创新点的说明(附在文章后, 100~300 字);请不要交寄个人,以免延误稿件的受理时间。本刊收到稿件后在 2~3 个工作日内 E-mail 发出收稿通知告知其他事项。稿件录用后,须提供文章修改定稿后的电子版(包括图)。

3.10 本刊现已进入《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》、《中国光学期刊网》等,不再另行通知作者,对版权有特殊要求者,请事先声明。

4 审稿程序 稿件收到评审费后分送两位同行评议、主编终审、择优录用;编辑部自收稿日起 4 个月内将初审意见函告作者,逾期,作者可自行处理原稿,但需告知编辑部。

5 版权转让 在审稿通过后,作者须转让著作权人作品著作权(包括各种介质、媒体的版权)给编辑部,并把全部作者签名附单位盖章的版权转让函。

6 录用与否 录用稿件作者应遵照中国科协有关文件精神,支付适量版面费以聊补期刊的高额亏损。由于近年来来稿量猛增,为了缩短发表周期,请作者精炼文章内容,更不要加附录,否则,超过 4 页的文章将加收版面费。编辑部有权对录用稿件作编辑意义的增删加工。录用稿一经本刊刊登,本刊享有版权,并向作者酌付稿酬,寄送该期期刊一册和抽印本 10 份。

7 投稿及回复时,请告知作者的有效联系方式 除“姓名、通讯地址、邮政编码”外,E-mail、电话(办公室及家庭或宿舍)、手机等是必不可少的。并用 E-mail 回复修改意见和修改稿(修改部分请划线)。最好注明通讯作者(作者单位相对稳定)。

8 请推荐 3~5 位同行专家(包括海外华人研究人员)作候选审稿人 (给出他们从事研究的学科和课题,通讯地址和 E-mail)。