

文章编号: 0258-7025(2008)03-0373-05

# 基于掺镧锆钛酸铅电光材料的 光学相控阵光束扫描器

董作人 叶 青 瞿荣辉 方祖捷

(中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

**摘要** 基于掺镧锆钛酸铅(PLZT)电光陶瓷材料的光学特性,提出了一种具有上下电极结构的光学相控阵高速光束扫描器。在理论上,分析了具有这种结构的光学相控阵的光束电光偏转特性和机制;在实验上,分析了掺镧锆钛酸铅材料的相位调制特性和损耗特性,制作了相关的光学相控阵器件,并构建了相应的测试系统,获得了光束在空间的角度偏转,与理论分析结果相符。

**关键词** 光电子学;光学相控阵;光束扫描器;掺镧锆钛酸铅;相位调制

**中图分类号** TN 204 **文献标识码** A

## Optical Phased-Array Beam Deflector Based on Lead Lanthanum Zirconate Titanate Electro-Optic Ceramic

Dong Zuoren Ye Qing Qu Ronghui Fang Zujie

(Information Optics Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** Based on the optical characteristics of lead lanthanum zirconate titanate (PLZT) electro-optic ceramic, an optical phased-array beam deflector with up-down electrode structure's transverse electro-optic effect was proposed. The electro-optic deflection characteristic and mechanism of the deflector were analyzed theoretically. And the phase modulation and electro-induced loss characteristics were measured experimentally. A systematic experiment of related optical phase-array devices and measuring system was also designed to verify the theoretical results. The results show that the beam obtains a relative large angle deflection by using different applied voltages.

**Key words** optoelectronics; optical phased-array; beam deflector; lead lanthanum zirconate titanate; phase modulation

### 1 引 言

在激光光电子领域的许多应用中,如光存储、光通信和光互连,都需要光束的空间扫描。目前,传统的方法通常是采用一个转镜或振镜来实现。这种采用机械运动的方法光损耗小,扫描范围大,结构简单,但是其缺点是扫描速度和精度相对较低。为了提高扫描速度,减小器件的体积重量,适应空间应用的需要,人们正在对光学相控阵技术进行深入的研

究。光学相控阵<sup>[1]</sup>是一种使光束波面的光相位产生周期性调制的光学器件。目前,光学相控阵的研究主要采用液晶,电光晶体(如 LiTaO<sub>3</sub>)<sup>[2]</sup>、半导体波导(如 AlGaAs/GaAs)和电光陶瓷掺镧锆钛酸铅(PLZT)等材料。文献[3]采用液晶制作的相位调制器阵列,具有驱动电压低、阵列周期小和光束扫描角度大等优点,但是调制速度低、热稳定性差、工作波长范围受限制。文献[4~6]采用 GaAlAs/GaAs

收稿日期:2007-07-17; 收到修改稿日期:2007-10-31

基金项目:国家自然科学基金(60577036)和中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目资助课题。

作者简介:董作人(1971—),男,黑龙江人,副研究员,博士研究生,主要从事光学相控阵和光电跟踪测量领域的研究。

E-mail: zrdong@siom. ac. cn

导师简介:方祖捷(1942—),男,浙江人,研究员,博士生导师,主要从事半导体激光和光电子器件领域的研究。

E-mail: zjfang@siom. ac. cn

制作的光波导阵列光学相控阵,在高速、大扫描角度、低驱动电压等方面具有优点,但是工作波段和输出功率等方面有一定的限制。掺镧锆钛酸铅是一种具有电光效应的透明陶瓷,近年来倍受重视。它具有大的电光系数(约为  $\text{LiNbO}_3$  的 10 倍左右)、宽的透射光谱( $0.5 \sim 10 \mu\text{m}$ )<sup>[7]</sup>、低的损耗和便宜的价格,因此被广泛应用于光存储、电光开关<sup>[8]</sup>和光学相控阵<sup>[9,10]</sup>等技术中。

为了避免电场强度和光程之间的矛盾,本文将器件设计为上下表面电极布局的横向电光调相器件。这一结构合理地分解了光程和电场强度这两个因素,可以通过两种方法来增大相移量,一是减小材料厚度、提高电场强度;二是在不改变电场强度情况下,增加光束在材料中通过的光程。这就解决了文献[9]和[10]所采用的结构中光程和电场强度之间的矛盾。

## 2 基本原理

图 1 为基于电光材料的光学相控阵光束扫描器的基本原理示意图。它是由多个等周期的独立调相阵列单元组成的。一束波前为平面的光束入射到光学相控阵器件的前端面上,经过不同调相单元的光束在电光效应的作用下获得不同的相移,其出射的相位面将变为台阶状,其包络形状取决于在不同调相单元上施加电压的分布。通过外加电压的控制,使光束整体相位面呈现为线性分布的台阶。这一分布等价于相位面的偏转,从而可以实现光束的扫描。

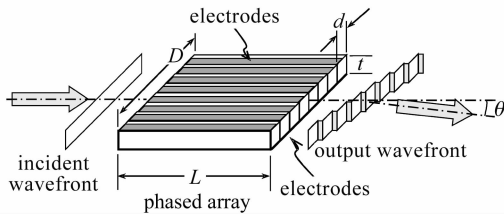


图 1 光学相控阵光束扫描基本原理示意图

Fig.1 Basic scheme of optical phased-array beam deflector

入射波前为平面的光束经过调相阵列后,转变为线性台阶分布的波前,远场光束的强度分布为<sup>[9]</sup>

$$I(\theta) = C \cdot E(\theta) \cdot A(\theta), \quad (1)$$

式中  $C$  为强度的常数比例因子,  $\theta$  为角度量,  $E(\theta)$  和  $A(\theta)$  分别为阵列器件的单元因子和阵列因子,它们可以近似表示为

$$E(\theta) = \left[ \left( \frac{w}{d} \right) \cdot \text{sinc} \left( \frac{w\theta}{\lambda} \right) \right]^2, \quad (2a)$$

$$A(\theta) = \left( \frac{\sin \left[ N\pi \left( \frac{d}{\lambda} \right) \cdot (\theta - \theta_i) \right]}{N \cdot \sin \left[ \pi \left( \frac{d}{\lambda} \right) \cdot (\theta - \theta_i) \right]} \right)^2, \quad (2b)$$

式中

$$\theta_i = \left( \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right) \cdot \left( \frac{\lambda}{d} \right), \quad (2c)$$

式中  $\theta_i$  为电光调制导致的光束偏转,  $d$  为阵列单元的周期,  $w$  为单元电极的宽度,  $N$  为阵列单元数目。单元因子(2a)式反映了每个单元近似为矩形窗口的衍射效应。阵列因子(2b)式反映了阵列各单元之间在远场发生的多光束干涉效应。 $\Delta\varphi$  为电光效应引起的相邻单元之间的相位差,它主要取决于电光效应引起的折射率变化和光程两个因素。掺镧锆钛酸铅陶瓷根据其组分和烧结工艺的不同,可以分为具有线性电光效应或二次电光效应的两种类型。二次电光效应材料的折射率变化量,与外加的电场强度的平方成正比,而与电场的方向无关。本文利用国产的组分为 9/65/35 的高性能二次电光效应掺镧锆钛酸铅材料开展研究。在图 1 所示的调相器结构中,光束经过长度为  $L$  的材料传输后,将获得正比于电场强度平方的附加相移

$$\varphi = \Delta nkL = \frac{1}{2} n^3 R_{11(12)} \left( \frac{V}{t} \right)^2 kL, \quad (3a)$$

相邻调相单元之间的相位差可以表示为

$$\Delta\varphi = (\Delta n_{i+1} - \Delta n_i) kL = \frac{\pi L}{\lambda t^2} n^3 R_{11(12)} (V_{i+1}^2 - V_i^2), \quad (3b)$$

式中  $R_{11}$  为掺镧锆钛酸铅材料的入射光偏振方向平行于外加电场方向时的二次电光系数,  $k$  为入射光的波矢量,  $n$  为调相阵列材料的折射率,  $\Delta n$  为由电光效应所引起的材料折射率变化,  $V$  为电压。假如采用互相垂直的方向,系数为  $R_{12}$ 。为了获得线性包络的输出波前,各个调相单元施加的电压  $V_i$  应当满足条件

$$V_i \propto \sqrt{i} = \sqrt{i} \cdot V_1, \quad (4)$$

此时各相邻单元之间具有相同的相位差,使相位面整体呈线性分布。通过调节外加电压,就可以实现远场干涉光束在一定角度范围内的扫描。

对于文献[9]和[10]所采用的器件结构,可以给出其电光效应相移的基本关系式。文献[9]采用横向电光效应,但是外加电压产生的电场随光程增加迅速减小,其相移为

$$\varphi = \Delta nkL \propto kR_{11(12)} \int_0^L E^2(z) dz, \quad (5a)$$

式中  $E(z)$  为位置  $z$  处的电场强度。文献[10]采用纵

向电光效应,其相移可表示为

$$\varphi = \Delta n k L \propto R_{12} \left(\frac{V}{L}\right)^2 k L, \quad (5b)$$

显然,两种结构不能利用加长光程获得大的相移。文献[10]的结构,从原理上要减小光程,即电极间距来增加相移。相移量与电极间距成反比。在本文的结构中,相移量与电极间距的平方成反比,因此减小电极间距的效果更明显。而且,文献[10]的结构不能利用一般电光效应较强的  $R_{11}$  来调相。本文采用的结构可以同时采用加长光程与减小电极间距这两个措施,这就为降低工作电压提供了有利条件。

### 3 实验装置和实验结果

根据理论分析,制备了掺镧锆钛酸铅调相器阵列,并进行了光束偏转的实验研究。实验装置如图 2 所示。从氦氖激光器出射的波长为 633 nm 的相干光,经过偏振片、透镜组扩束,柱面透镜压缩光斑。在入射到调相器阵列之前插入一个与阵列等周期的幅度掩模板,以消除或减弱调相单元之间无电极区的光波。光路上用一个平行于器件平面的狭缝光阑,阻挡杂散的散射光。出射的光束打在 7.2 m 处的光屏上,用摄像设备进行记录。图 3 为调相阵列器件的实物照片。实验制备的阵列器件,周期  $d$  为 300  $\mu\text{m}$ ,电极区的通光孔径  $w$  为 130  $\mu\text{m}$ ,材料厚度为 1 mm,阵列周期数为 8,器件总宽度为 2.4 mm。阵列器件的 8 个单元打上了电极引线;每个单元各自用一个电位器事先调整好电压比例,满足(5)式的要求。由于掺镧锆钛酸铅为良好的电绝缘材料,在调整外加电压时可以保证这一比例不会变化,并在实验中对此做了验证。

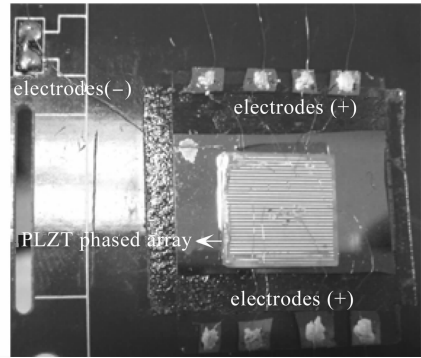


图 3 掺镧锆钛酸铅调相阵列结构的实物照片  
Fig. 3 Photograph of PLZT modulated-phase array structure

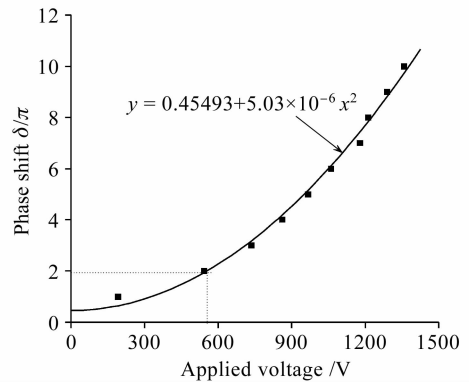


图 4 相控阵调相单元相位随应用电压的变化  
Fig. 4 Phase of modulated-phase unit varies with the applied voltage

$= 2.1 \times 10^{-16} \text{ V}^2/\text{m}^2$  和  $R_{12} = -0.37 \times 10^{-16} \text{ V}^2/\text{m}^2$  [11]。图中曲线为二次函数的拟合,显示了典型的二次电光效应特性。其中零点有所偏离,这是材料的小量迟滞非线性质的反映。

图 5 为远场光屏上显示的光束偏转的照片记录。光屏上用了一组文字背景,使光斑移动显示得更清晰。从图可以看出,经调相器阵列的输出光斑呈现了明显的干涉效应。这与(2b)式描写的理论

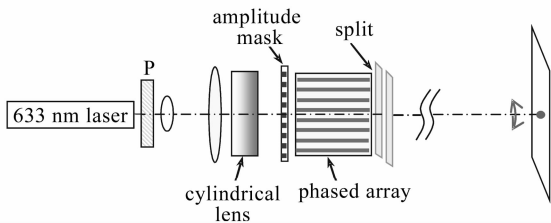


图 2 掺镧锆钛酸铅调相阵列光束扫描器的实验系统  
Fig. 2 Experimental scheme of optical phased-array beam deflector based on PLZT electro-optical ceramic

实验中使用的掺镧锆钛酸铅电光陶瓷为细徊线型二次电光效应材料,具有相对较大的电光系数。图 4 为调相单元的相位随外加应用电压的实验测试结果,其中入射光偏振方向平行于外加电场。测试结果表明,使用的掺镧锆钛酸铅二次电光系数分别为:  $R_{11}$

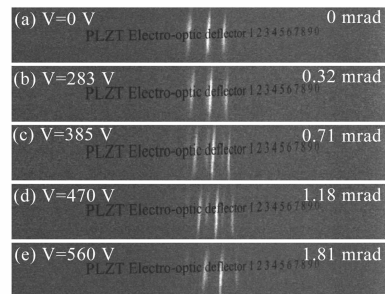


图 5 不同外加电压引起的掺镧锆钛酸铅调相阵列光束的偏转  
Fig. 5 Beam deflection of modulated-phase array varies with the different applied voltages

性质一致。根据阵列单元器件的周期和激光波长,可以计算得到干涉条纹对应的角度为 $2.1 \text{ mrad}$ 。在施加不同电压下记录了干涉条纹的移动。当施加的电压为 $283 \text{ V}$ ,  $385 \text{ V}$ 和 $470 \text{ V}$ 时,中心条纹偏转的角度分别为 $0.32 \text{ mrad}$ ,  $0.71 \text{ mrad}$ 和 $1.18 \text{ mrad}$ ;在 $560 \text{ V}$ 电压下,条纹移动接近一个周期,偏转角度达 $1.81 \text{ mrad}$ 。

## 4 讨 论

在 $560 \text{ V}$ 工作电压下,取得了 $1.81 \text{ mrad}$ 光束偏转。这一数据虽然与文献报道的结果相比有所改善,但是与实际应用的要求还有大的距离。本文工作的意义在于提出了一种与文献报道不同的结构,理论分析和实验验证表明其具有合理性。随着材料性能的提高,采用更薄的材料厚度,有望进一步降低工作电压。

值得指出的是,掺镧锆钛酸铅材料虽然具有宽的透射光谱( $0.54 \sim 10.4 \mu\text{m}$ )和低的传输损耗,但是在高电压下存在电致散射引起的损耗。图6为实验测量得到的掺镧锆钛酸铅电光材料的电致损耗特性。对于测量样品,在外加电压小于 $600 \text{ V}$ 时,电致损耗很小;外加电压超过 $600 \text{ V}$ 时,损耗将急剧增加;在 $1000 \text{ V}$ 的外加电压下,损耗可达 $8\%$ 。因此,采用合理的设计,降低工作电压,不仅可以降低系统的功耗,而且对于减小电致损耗也是十分必要的。

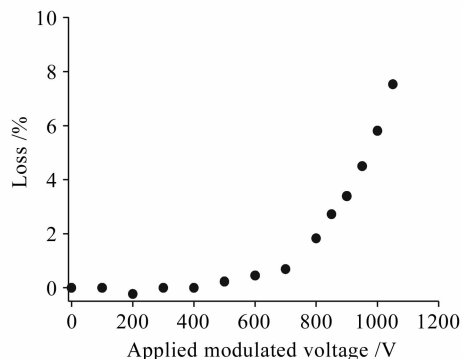


图6 掺镧锆钛酸铅电光材料的电致损耗随外加电压的变化

Fig. 6 Electro-induced loss of PLZT electro-optic ceramic varies with the applied voltage

所制备的阵列单元的电极宽度为 $130 \mu\text{m}$ ,调相单元的填充因子为 $43\%$ ,因而实验中可观察到未受电光效应相移的那部分光波没有发生偏转。为此,在图2的实验装置中增加了幅度掩模板,以便阻挡窗口之外的光波,但是在图5的照片中仍然可以看到未受偏转的较弱的光斑。这一方面是由于幅度掩

模板不可能严格挡住电光窗口外的光波,更重要的是由于进入电光窗口部分的光波在 $10 \text{ mm}$ 长的材料中传输时会发生衍射,进入电极外的区域。根据衍射特性粗略估计,扩展可达 $20 \mu\text{m}$ 左右。因此,器件的结构设计还有待进一步改进,比如采用横向的波导结构,减小光束扩展,并在器件的输出端设置幅度掩模板。

根据(2)式所表示的基本理论,要增大光束扫描的角度范围,就必须减小调相阵列的周期。就本文所用的掺镧锆钛酸铅体块材料而言,采用精密光学加工的方法,有可能实现比本文器件的尺寸更加微小的几何结构,比如数十微米的量级。要进一步加大扫描角度,就需要采用波导结构和工艺。这也是近年来国内外有关专业人士正在努力的目标。

## 5 结 论

基于掺镧锆钛酸铅电光陶瓷材料具有较大电光系数等效应的基础上,提出和演示了一种上下电极结构的光学相控阵光束扫描器。理论分析表明,本结构可以降低工作电压,具有较小功耗,并将有利于提高扫描速度。利用国产掺镧锆钛酸铅材料研制了调相器阵列,在 $560 \text{ V}$ 的工作电压下,获得了 $1.81 \text{ mrad}$ 的光束偏转。

致谢 感谢中国科学院上海硅酸盐研究所丁爱丽研究员为本文提供了实验所用的掺镧锆钛酸铅电光陶瓷材料。

## 参 考 文 献

- 1 P. F. Mcmanamon, T. A. Dorschner, D. L. Corkum *et al.*. Optical phased array technology [J]. *Proc. IEEE*, 1996, **84** (2):268~298
- 2 R. A. Meyer. Optical beam steering using a multichannel lithium tantalate crystal [J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(3):613~616
- 3 G. D. Love, J. V. Major, A. Purvis. Liquid-crystal prisms for tip-tilt adaptive optics [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(15):1170~1172
- 4 F. Vasey, F. K. Reinhart, R. Houdre *et al.*. Spatial optical beam steering with an AlGaAs integrated phased array [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(18):3220~3232
- 5 Shi Shunxiang, Li Jiali, Wang Guangsheng *et al.*. A novel optical waveguide array electro-optic fast scanner [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(11):1318~1322  
石顺祥,李家立,王广生等.一种新型的光波导阵列电光快速扫描器[J]. *光学学报*, 2002, **22**(11):1318~1322
- 6 Liang Huawei, Shi Shunxiang, Li Jiali. Study on characteristics of an optical waveguide array in a novel type of electrooptic scanners [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(11):1654~1658  
梁华伟,石顺祥,李家立.新型电光扫描器中光波导阵列特性研

- 究[J]. 光子学报, 2006, 35(11):1654~1658
- 7 D. Goldring, Z. Zalevsky, E. Goldenberg *et al.*. Optical characteristics of the compound PLZT [J]. *Appl. Opt.*, 2003, 42(32):6536~6543
- 8 Feng Liu, Qing Ye, Fufei Pang *et al.*. Polarization analysis and experimental implementation of PLZT electro-optical switch using fiber Sagnac interferometers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 2006, 23(4):709~713
- 9 J. A. Thomas, Y. Fainman. Optimal cascade operation of optical phased-array beam deflectors [J]. *Appl. Opt.*, 1998, 37(26):6196~6212
- 10 Qiwan Song, Xuming Wang, R. Bussjager *et al.*. Electro-optic beam-steering device based on a lanthanum-modified lead zirconate titanate ceramic wafer [J]. *Appl. Opt.*, 1996, 35(17):3155~3162
- 11 Zuoren Dong, Qing Ye, Ronghui Qu *et al.*. Characteristics of a PLZT electro-optical deflector [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, 5(9):540~542

## 征 稿 简 则

《中国激光》是由中国光学学会和中国科学院上海光学精密机械研究所共同主办, 科学出版社出版的学术期刊, 国内外公开发刊。

### 1. 刊登内容

主要发表我国科技人员在激光理论与技术领域的最新进展, 栏目包括: 综述、实验技术与元件、激光物理与化学、全息技术、光束传输、光通信及其元器件、光纤元件、测量技术、材料、薄膜、激光应用、激光生物学与医学, 等等。请作者在来稿中注明所投栏目, 并注明所属中图分类号。

### 2. 投稿与查询

本刊接受 Email 投稿或网络投稿, 投稿信箱: submit@siom.ac.cn, 网络投稿与查询: 登录中国光学期刊网 www.opticsjournal.net。来稿请注明作者真实姓名、服务单位、详细通信地址、联系电话、邮政编码及电子信箱。本刊收到稿件后在 2~3 个工作日内 Email 发出收稿通知。作者投稿 2 个月内未收到本刊处理意见, 可另投他刊。但需事先告知本刊编辑部。编辑部有权对来稿删改。来稿请勿涉及保密内容, 并请提供相关单位证明。来稿请附所有作者签名, 作者顺序一经确定, 请勿任意删改。可同时提供 6~8 位国内外同行专家的详细通讯方式和研究领域, 供送审时参考。

### 3. 来稿要求

#### 3.1 文字要求

来稿应含中英文题目、摘要、关键词和第一作者简介, 全文要求在 5000 字以内。来稿请用小 4 号, 1.5 倍或 2 倍行距, 另用不同颜色标明文内尤其公式内易混淆的大小写、上下角码、文种、算符等。计量单位一律采用国家标准 GB3100-3102-93 规定, 摘要和正文中的缩略词在第一次出现时都必须写出全称, 后附缩略词。

#### 3.2 标题与摘要

标题应言简意赅, 字数控制在 20 字以内, 不使用不公认的外文缩写词(化学符号除外)。中英文摘要请用第三人称叙述, 不使用“本文”或“作者”等主语, 不引用参考文献、数学公式和化学式。内容应包括四个要素: 即研究目的、方法、结果、结论。中英文摘要内容应基本对应, 中文摘要 300 字左右, 英文摘要 150~180 个单词。

#### 3.3 关键词

每篇论文应给出 4~8 个关键词, 第一个列出该文主要工作或内容所属的二级学科名称, 第二个列出该文研究得到的成果名称或文内若干个成果的总类别名称, 第三个列出该文在得到上述成果或结论时采用的科学研究方法的具体名称, 第四个列出在前三个关键词中没有出现的, 但作为主要研究对象的事或物质的名称, 如有需要, 还可以列出作者认为有利于检索和文献利用的第五、第六个等关键词。

#### 3.4 图表

要求设计美观, 大小适中, 尺寸一般不小于 5 cm×7 cm, 线条均匀, 主辅线分明, 粗线一般为 0.25~0.5 mm, 细线一般为粗线的 1/2, 图中主线用粗线, 如函数曲线等, 辅线用细线, 如坐标轴线、指示线等; 照片要求对比度高, 层次清晰。推荐使用三线表。图题、表题须中英文对照, 图面、表面一律采用英文。

#### 3.5 参考文献

应引用公开出版物, 并仔细核对; 欢迎作者充分引用本刊上同行的文献。每条文献应作相应的文献类型标识(见方括号内)。参考文献的原文为英文, 请用英文表示, 如原文为其他语种, 请译成英文, 在该文献最后用括号注明, 如原为日文, 则用(in Japanese), 如原文为中文, 则给出中文和相应的英文译文。每条文献的顺序和标点如下: 专著[M]、学位论文[D]、报告[R]——著者(三名)。文献题名。版本(专著用), 出版地: 出版者, 出版年。起止页码; 期刊[J]——作者(三名)。论文题目[J]。刊名, 出版年, 卷(期): 起止页码; 专利[P]——专利申请者。专利题目[P]。专利国别, 专利文献种类, 专利号, 出版日期; 文集[C]——作者(三名)。论文题目[C]。编者, 论文集名, 出版地: 出版者, 年。起止页码。

#### 3.6 基金资助、作者简介

论文如获省、部级以上的基金资助, 须在首页的脚注位置注明基金资助单位全称及批准号。作者简介(含导师简介)应给出姓名(出生年—), 性别, 籍贯, 民族(汉族可省略), 职称, 学历, 研究方向, Email。

### 4. 收费

本刊遵照中国科协和中国科学院有关文件精神, 向录用稿件作者收取适量版面费以聊补本刊的高额亏损。

### 5. 版权

录用稿件一经刊出, 论文版权(含各种介质)均归编辑部所有。本刊向作者酌付稿酬及赠送该期期刊 1 册, 抽印本 10 份。

本刊已入编《中国学术期刊(光盘版)》和中国光学期刊网, 著作权使用费在奉寄作者稿酬中一次性支付。如有不同意将文章编入上述数据库者, 请事先声明, 本刊将作适当处理。

**特别声明:** 凡已在国内外正式出版物上登载过的稿件, 本刊一律不予刊登。若发现一稿多投者, 本刊三年内不接受其稿件, 并追补对本刊造成的损失。

凡本刊投稿者, 均视作接受上述各项规定, 本刊不再另行声明。

本刊在办刊过程中, 得到了社会各界的大力协助, 谨致谢忱。