

文章编号: 0253-2239(2005)09-1283-5

光学微腔用磷酸盐玻璃基体的研究*

陈福义 介万奇

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 西安 710072)

摘要: 量子点光学微腔器件在低阈值激光器和单光子光源等量子信息处理技术领域有重要的应用前景。为了有效地实现受激辐射,光学微腔需要在高介电常量的玻璃微球中嵌入高浓度的量子点。为此使用玻璃技术开展了在磷酸盐玻璃中生长高浓度 II-VI 族量子点的研究,探索了 ZnO-P₂O₅、CdO-P₂O₅ 和 CdS-P₂O₅ 二元磷酸盐玻璃的形成能力、红外通过率、结晶行为和微腔成形能力。在这些玻璃基体中,ZnO 的最大溶解度为 0.6, CdO 和 CdS 的溶解度为 0.4;基体表现出和商用截止型过滤片玻璃相似的光吸收特性,并与玻璃的种类和成分含量无关;基体晶化后可以析出 α -Zn₂P₂O₇ 或 CdS 等晶相,其中 CdS 相均匀分布在试样中;磨细的玻璃基体可以成型为球表面完整和椭圆度小的微腔。试验结果表明,ZnO-P₂O₅ 和 CdS-P₂O₅ 等二元磷酸盐玻璃可以成型为光学微腔并可以有效地生长出高浓度的 II-VI 族量子点。

关键词: 量子光学;量子点;光学微腔;磷酸盐玻璃

中图分类号: O431 文献标识码: A

Phosphate Glass Matrices Prepared for Optic Microcavity

Chen Fuyi Jie Wanqi

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Department of Materials Science,
Northwestern Polytechnic University, Xian 710072)

Abstract: Quantum dot optic microcavity device had potential application in field of quantum information technology using as the low threshold laser and single photon light source etc. High density of quantum dot need be implanted into the glass microsphere with high dielectric constants in order to realize the optic gain and lasing. The glass formation ability, infrared, crystallization thermal stability and microcavity forming ability in the ZnO-P₂O₅, CdO-P₂O₅ and CdS-P₂O₅ binary phosphate glass system were investigated. The maximum solubility of ZnO in the glass is 0.6 mole fraction, and that of CdO and CdS is 0.4 mole fraction. The glass matrices have a similar light absorption character to those commercial cut-off filter glass, which was not dependent on the composition of the glass. The α -Zn₂P₂O₇ or CdS solid phase was precipitated in the crystallized glass matrices, where CdS phase has a uniform distribution in matrices. The powdered glass matrices can easily be formed into microcavity with a perfectly round sphere using thermal spray method. It was concluded that the ZnO-P₂O₅ and CdS-P₂O₅ binary phosphate glass can be formed into optic microcavity and the high density of II-VI group quantum dot can grow in CdS-P₂O₅ glass matrices.

Key words: quantum optics; quantum dots; optic microcavity; phosphate glass matrices

1 引 言

光学微腔是尺寸在光子波长数量级的激光谐振腔,高介电常量的玻璃微球中存在回音壁型(WGM)的光子共振模式,是一种 WGM 型光学微腔。将量子点嵌入微腔中,可以制造出量子点(Dot in Dots)结构的量子点微腔器件^[1,2]。量子点微腔

具有光子禁带结构。高品质的量子点微腔可用作频率标准、单频光发射和探测器、极低阈值激光器。进一步生长成三维阵列制备出量子点光子晶体。利用量子点微腔器件的单激子复合,可以制作无阈值激光器、单光子光源,用于量子信息处理和量子计算。

目前国外^[3]和国内^[4,5]的研究者主要使用有机

* 国家自然科学基金(2004CG04006)和西北工业大学青年创新基金(2004M016203)资助课题。

作者简介: 陈福义(1966~),男,山西榆次人,副教授,博士,主要从事量子点发光材料、光子禁带材料、晶体生长和凝固理论研究。E-mail: fuyichen@yahoo.com

收稿日期: 2004-07-21; 收到修改稿日期: 2004-12-15

玻璃(PMMA)和商用截止型过滤片玻璃(主要是 Corning 和 Schott 公司的产品)为基体来制造量子点光学微腔。有机基体的量子点微腔器件的耐久性差,缺乏可行的将量子点以特定的取向嵌入光学微腔的方法。而商业过滤片玻璃最初不是为了研究量子点光学微腔现象而设计的,在这些玻璃中原位生长量子点不可避免出现其他微晶。目前商业过滤片玻璃多为硅酸盐和硼硅酸盐基础体系,基体中 CdS, CdSe 和 CdTe 等半导体量子点的质量分数一般小于 0.001^[6~8]。这样,即使在玻璃中可以有效地实现光增益^[9],也难以满足强限制情况下的量子点受激辐射(lasing)条件^[10],例如,在量子点发光二极管和激光器件中为了增加量子点密度,活性层由密度为 10^{10} cm^{-2} 的 10 层量子点叠加形成^[11,12],量子点结构的光学微腔中量子点密度也至少应该达到室温时本征半导体中电子-空穴对 10^{10} 的数量级。

玻璃光学微腔难以掺杂或析出体积分数比较高的 II-VI 量子点,这限制了其实现高效的受激辐射。国内外大量的研究工作集中在探索新的方法(如高频溅射、溶液生长)和尝试新的基体(如胶体玻璃、有机介质)来解决这一难题。其中,磷酸盐玻璃为基体的量子点研究很少有文献报道,俄罗斯圣彼得堡国立技术大学的一个研究小组 Lipovskii^[13,14] 和 Vaynberg^[15] 等设计和开发了一个新的磷酸盐玻璃基体,主要成分为 $\text{P}_2\text{O}_5\text{-Na}_2\text{O-ZnO-AlF}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$, 生长了 CdS, CdSe, $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$, CdTe, ZnSe 等 5 种量子点,发现 CdSe 在磷酸盐基体中的最大质量分数在 0.007%~0.011 之间, CdSe 量子点为六方晶系的铅锌矿结构。就目前文献而言,还没有以磷酸盐玻璃为基体的高浓度量子点(如体积分数 > 5%)的制备研究报告。

本文为了制备新的高浓度量子点光学微腔,研究了 ZnO- P_2O_5 等三个磷酸盐玻璃体系,探索了使用这些体系的玻璃制备光学微腔,从玻璃中原位生长出 CdSe 等量子点的研究设想。同时应该指出的是,在熔制工艺上实现了可以使 P_2O_5 原料预先反应从而减少其在熔化阶段对炉体的腐蚀的工艺方法,对于磷酸盐玻璃的研究和实际生产有重要的实用意义。

2 实 验

实验研究了 $x\text{ZnO-(1-x)}\text{P}_2\text{O}_5$, $x\text{CdO-(1-x)}\text{P}_2\text{O}_5$ 和 $x\text{CdS-(1-x)}\text{P}_2\text{O}_5$ 三种磷酸盐玻璃基体,每种玻璃基体按照 $x=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ (摩尔分

数,下同)取四个成分点进行比较。出发材料为分析纯的 ZnO, CdO, CdS, P_2O_5 等商品化学原料,商品原料不加提纯直接使用。每一成份配 1 mol 料,按照成分称量后置于通风柜中的烧杯中混料。本实验使用了新的混料工艺,除 CdO 外,混合 ZnO、CdS 和 P_2O_5 时,将烧杯中的原料搅拌后瞬时加热至高温,使原料之间发生自发的固相反应,从而减少了 P_2O_5 等原料对炉体的腐蚀。玻璃熔制使用 250 ml 高铝坩锅,在硅钼棒加热炉中熔化。熔制时在 900~1000 °C 之间装料 2 到 3 次,然后在 1300 °C 的熔制温度上保温 0.5 h。熔体在不锈钢模具中浇注成 50 mm×20 mm×3 mm 的试样,并在 300 °C 退火 12 h 后随炉冷到室温。然后将所得样品经 X 射线分析确定为玻璃相后,储存在干燥皿中备用。

对制得的玻璃试样,使用 Thermo Nicolet Nexus 红外透过谱仪进行了红外透过谱分析,将玻璃试样在 550 °C 下热处理 24 h 后,使用 Amary 扫描电镜观测了析出晶体的形貌。将玻璃试样在 550 °C 下热处理 48 h 后,使用 X 射线衍射分析了析出晶体的相组成。

实验进一步研究了磷酸盐玻璃微球微腔的制备,将制得的(0.4ZnO·0.6 P_2O_5)玻璃破碎后,在玛瑙研钵中研磨成细粉,筛分后在氧-煤气石英玻璃热喷涂灯中吹制了玻璃微球,使用扫描电镜观察了微球的形貌。

3 实验结果和分析

3.1 玻璃形成能力

在本实验的熔化和冷却条件下,大量的 ZnO, CdO 和 CdS 可以溶解在 P_2O_5 熔体中,并形成玻璃态,三个体系形成玻璃的成分范围如表 1 所示。

表 1 三个体系的磷酸盐玻璃基体的形成范围
Table 1 Glass formation range of three phosphate glass matrices

	Mole fraction of P_2O_5			
	0.2	0.4	0.6	0.8
ZnO	C	G	G	G
CdO	not melted	C+G	G	G
CdS	C	C+G	G	G

C: crystalline solid, G: glassy solid

从表 1 可以看出,在 ZnO- P_2O_5 体系中,网络形成体 P_2O_5 的摩尔分数为 0.4 时,还可以形成玻璃;在 CdO- P_2O_5 和 CdS- P_2O_5 体系中,体系形成玻璃时 P_2O_5 的最低摩尔分数为 0.6,当体系 P_2O_5 的摩尔

分数小于 0.6 时,熔体冷却后为玻璃相和晶体相共存,当体系 P_2O_5 的摩尔分数小于 0.2 时,CdO 不能完全溶解。在磷酸盐玻璃基体中,ZnO 的最大溶解度为 0.6, CdO 和 CdS 的溶解度为 0.4。

实验中的磷酸盐玻璃可以加载高浓度的 ZnO、CdS 等光学活性物质,为原位生长高浓度量子点建立了基本的物质条件。

3.2 玻璃的红外透过率

实验得到的这些磷酸盐玻璃基体都是可见光透明的。将试样加工成片状样品后,进行了红外透过率测量,结果如图 1 所示。从图中可以看出,所有基体显示出相似波数和相对强度关系,在波数为 3500 cm^{-1} 处存在红外吸收边,与玻璃的种类和成分含量无关,玻璃基体表现和商用截止型过滤片玻璃相似的光吸收特性。

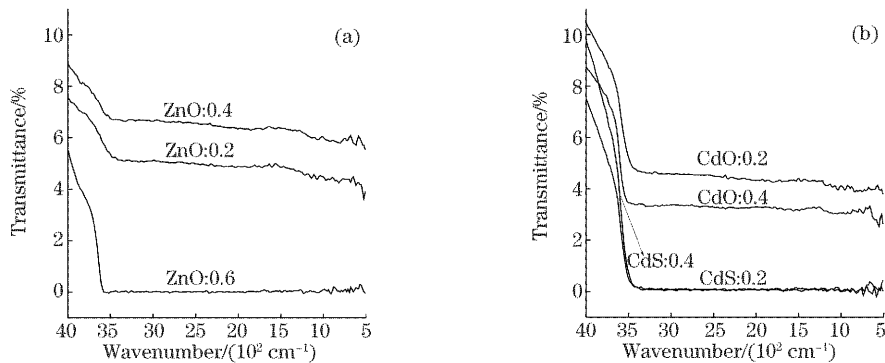


图 1 几个磷酸盐玻璃基体的红外透过率图谱

Fig. 1 IR transmission spectra of several bulk phosphate glass matrices

3.3 玻璃的晶化特征

实验研究了 P_2O_5 摩尔分数 0.6 时的三个基体 ($0.4\text{ZnO} \cdot 0.6\text{P}_2\text{O}_5$), ($0.4\text{CdO} \cdot 0.6\text{P}_2\text{O}_5$) 和 ($0.4\text{CdS} \cdot 0.6\text{P}_2\text{O}_5$) 的晶化特征,典型的结果如图

玻璃基体对红外光的吸收有以下四种不同的机制:第一是吸收,包括自由载流子和多声子引起的本征吸收;第二是密度和组分波动引起的本征瑞利散射;第三是过渡金属离子和氧化物等杂质引起的非本征吸收和散射;第四是玻璃中无序和缺陷引起的弱吸收。红外吸收边在 $3\text{ }\mu\text{m}$ 左右,与第二组元和杂质无关,是由磷酸盐玻璃结构中 $[\text{P}-\text{O}-\text{P}]$ 单元的本征吸收引起的。而除 ($0.4\text{ZnO}-0.6\text{P}_2\text{O}_5$) 成分外,ZnO、CdO 和 CdS 成分含量增加,玻璃基体红外透过率之间单调减少的,说明玻璃基体中第三种机制即 Zn^{2+} 和 Cd^{2+} 等间隙离子非本征吸收和散射起了主要作用。成分为 ($0.4\text{ZnO}-0.6\text{P}_2\text{O}_5$) 玻璃基体红外透过率曲线的异常可能是由于部分 Zn^{2+} 以 $[\text{Zn}-\text{O}-\text{P}]$ 形式参与了玻璃网络的形成。

2 所示。玻璃试样在 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 下热处理 24 h 后,在 ($0.4\text{ZnO} \cdot 0.6\text{P}_2\text{O}_5$) 玻璃试样中析出了少量分布杂散尺寸在 $200\sim 600\text{ nm}$ 间晶体,在 ($0.4\text{CdO} \cdot 0.6\text{P}_2\text{O}_5$) 玻璃试样中出现 50 nm 左右接近连续分

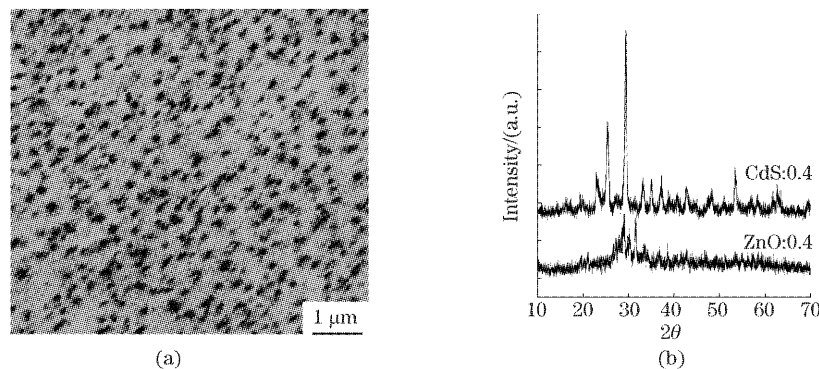


图 2 热处理后的磷酸盐玻璃基体析出相的微观结构和 X 射线分析结果。(a) ($0.4\text{CdS} \cdot 0.6\text{P}_2\text{O}_5$) 样品晶化后的扫描电镜照片, (b) ($0.4\text{ZnO} \cdot 0.6\text{P}_2\text{O}_5$) 和 ($0.4\text{CdS} \cdot 0.6\text{P}_2\text{O}_5$) 样品晶化后的 X 射线分析结果

Fig. 2 Microstructure and X-ray spectra for the several bulk phosphate glass matrices after heat treatment. (a) SEM photography of devitrified $0.4\text{CdS} \cdot 0.6\text{P}_2\text{O}_5$, (b) X-ray analysis results of devitrified $0.4\text{ZnO} \cdot 0.6\text{P}_2\text{O}_5$ and $0.4\text{CdS} \cdot 0.6\text{P}_2\text{O}_5$

布的晶体,在(0.4CdS·0.6P₂O₅)玻璃试样中析出了分布和尺寸均匀的200 nm左右的晶体。

玻璃试样在热处理48 h后,使用X射线衍射分析了析出晶体的相组成(0.4ZnO·0.6P₂O₅)试样中析出的白色晶体为 α -Zn₂P₂O₇,这个实验结果可以解释早期的研究工作的一个问题,即ZnO-P₂O₅体系可以高温溶液生长单晶,却不能以玻璃晶化方式生长出ZnO量子点,是因为 α -Zn₂P₂O₇的相稳定性比较高。(0.4CdO·0.6P₂O₅)试样析出的白色晶体为未知相,初步估计为Cd₂P₂O₇。(0.4CdS·0.6P₂O₅)试样析出的晶体为立方CdS,三个最强峰依次为闪锌矿结构CdS的(200),(100)和(311)面。按照玻璃结晶理论,可以推出基体中生长初期的小尺寸量子点的形貌和分布特征与这些长时间热处理

样品的微观结构相似,说明这些基体可以有效地生长出CdS等量子点。

3.4 光学微腔的形貌

对成分为(0.4ZnO·0.6P₂O₅)的锌磷玻璃基体进行了微球成型实验。微球在吹制时距喷枪近的地方收集到的粉体中,微球的成品率低、表面破损等情况多。距喷枪远的地方收集到的粉体中,球的完好率高。在光学显微镜下直接观察微球时,可表现出清晰和明亮的反射光。为了避免反射光对成像的影响,在扫描电镜下观察了距喷枪远处的微球的形貌,如图3所示。图3(a)为由大于500目的玻璃粉吹出的微球的形貌,微球的直径在10 μ m左右。图3(b)是粒度小于500目的玻璃粉吹出的微球的形貌,微球的直径为5~6 μ m。图中可见球的表面完整、椭圆度小。

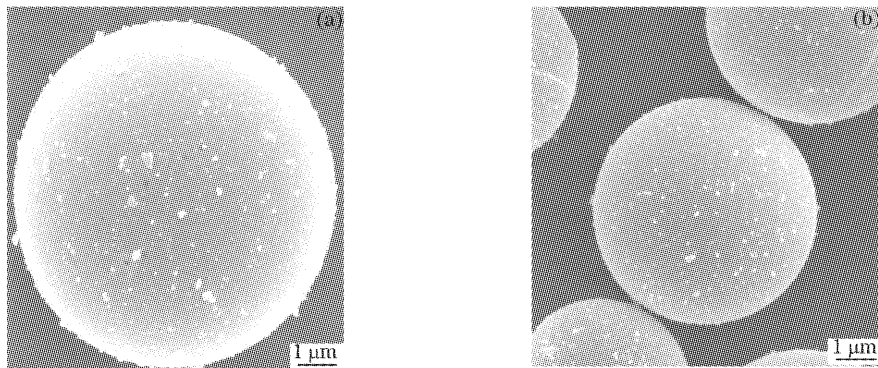


图3 扫描电镜下观察得到的微球形貌。(a)大于500目的微球,(b)小于500目的微球

Fig. 3 Morphology of the microsphere with different size under the SEM. (a) Microsphere with size over 500 grids, (b) microsphere with size below 500 grids

4 结 论

在ZnO-P₂O₅、CdO-P₂O₅和CdS-P₂O₅二元磷酸盐玻璃的实验研究中发现,ZnO、CdO和CdS在这些玻璃基体中的最大溶解度为0.4~0.6,溶解了ZnO、CdO和CdS的磷酸盐玻璃基体的红外透过谱表现出和商用截止型过滤片玻璃相似的光吸收特性;基体晶化后可以析出 α -Zn₂P₂O₇或CdS等晶相;这些玻璃基体可以成型为球表面完整和椭圆度小的微腔。试验结果表明,ZnO-P₂O₅和CdS-P₂O₅等二元磷酸盐玻璃可以成型为光学微腔并可以有效地生长出高浓度的II-VI族量子点。同时应该指出的是,在熔制工艺上提出的使P₂O₅原料预先反应的工艺,对于磷酸盐玻璃的研究和实际生产有重要的实用意义。

参 考 文 献

- 1 U. Woggon, R. Wannemacher, M. V. Artemyev *et al.*. Dot-in-a-dot: electronic and photonic confinement in all three dimensions [J]. *Appl. Phys B - Lasers and Optics*, 2003, **77**: 469~484
- 2 M. V. Artemyev, U. Woggon. Quantum dots in photonic dots [J]. *Appl. Phys Lett.*, 2000, **76**(11): 1353~1357
- 3 Gaponenko S V. *Optical Properties of Semiconductor Nanocrystals* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998
- 4 Rui Jia, Desheng Jiang, Pingheng Chen *et al.*. Quantum dots in glass spherical microcavity [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **79**(2): 153~157
- 5 Shulong Lu, Rui Jia, Desheng Jiang *et al.*. Lasing of CdS quantum dots in glass spherical microcavity [J]. *Physica E*, 2003, **17**(1~4): 453~455
- 6 P. D. Persans, L. B. Lurio, J. Pant. Zn incorporation in CdS nanoparticles in glass [J]. *Phys. Rev. B*, 2001, **63**: 115320~115327
- 7 T. M. Hayes, L. B. Lurio, J. Pant *et al.*. Order in CdS nanoparticles in glass [J]. *Sol. State. Commun.*, 2001, **117**: 627~634
- 8 Jiang Desheng, Li Guohua, Han Hexiang. Structural and optical properties of CdSe quantum dots in glass [J]. *J. Semiconductor*, 2001, **22**(8): 996~1001 (in Chinese)

- 江德生, 李国华, 韩和相. 玻璃中量子点的结构和光学性质[J]. 半导体学报, 2001, **22**(8): 996~1001
- 9 J. Butty, Y. Z. Hu, N. Peyghambarian *et al.*. Quasicontuous gain in sol-gel derived CdS quantum dots [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(18): 2672~2674
- 10 V. I. Klimov, A. A. Mikhailovsky, Su Ku *et al.*. Optical gain and stimulated emission in nanocrystal quantum dots[J]. *Science*, 2000, **290**(13): 314~316
- 11 Ning Yongqiang, Gao Xin, Wang Lijun *et al.*. Lasing characteristics of InGaAs/GaAs ridge like quantum dots laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(4): 293~296 (in Chinese)
- 宁永强, 高欣, 王立军等. 量子点类脊型激光器的激光特性[J]. 中国激光, 2002, **A29**(4): 293~296
- 12 Ye Hui, Xu Yuhuan, Machezie J D. Study of semiconducting ferroelectric SbSI quantum dot composite and its optical properties[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(12): 1507~1511 (in Chinese)
- 叶辉, Xu Yuhuan, Machezie J D. 铁电半导体碘硫化铋量子点复合材料及其光学性能的研究[J]. 光学学报, 2002, **22**(12): 1507~1511
- 13 A. A. Lipovskii, E. V. Kolobkova, V. D. Petrikov. Formation of II-VI nanocrystals in a novel phosphate glass[J]. *J. Crystal Growth*, 1998, **184/185**: 365~369
- 14 A. A. Lipovskii, I. E. Yakovlev, E. V. Kolobkova. Cadmium sulfide-selenide doped glasses: Silicate and phosphate glass matrices[J]. *J. Non-Crystalline Solids*, 1997, **221**: 18~25
- 15 B. Vayberg, M. Matusovsky, M. Rosenbluhl *et al.*. High optical nonlinearity of CdS_xSe_{1-x} microcrystals in fluorine-phosphate glass[J]. *Opt. Commun.*, 1996, **132**: 307~313

(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颤动测量中的应用[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,作者可另行处理原稿,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版权(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)。