

文章编号: 0253-2239(2007)04-0716-5

马普-赫斯棱镜透射比随入射角变化的波动研究

毕 佳 吴福全 郑萌萌

(曲阜师范大学激光研究所, 曲阜 273165)

摘要: 为了研究马普-赫斯棱镜透射比的入射角效应,从实验上测出了其透射比随光的入射角波动的现象。将与棱镜有关的各个参量转化到三点共轴系统的数学模型中,采用了多光束干涉理论以及菲涅耳公式详细推导了由于空气隙的反射而产生的一级光束和其它级次光束的干涉作用对透射比的影响,得到了较为精确的光强透射比公式;对实验中光强透射比随平面入射角的连续变化而呈现出的一定的波动现象做了很好的理论解释;同时从理论上给出当平面入射角为定值时透射比随方位角变化的波动曲线,说明了光强透射比随方位角变化也是波动的,且波动频率和波动幅度均随平面入射角绝对值的增大而增大。

关键词: 物理光学; 马普-赫斯棱镜; 透射比; 方位角; 平面入射角

中图分类号: O436 文献标识码: A

Study on the Transmittance of Marple-Hess Prism Undulating with the Incident Angle

Bi Jia Wu Fuquan Zheng Mengmeng

(Laser Ressearch Institute, Qufu Normal University, Qufu 273165)

Abstract: In order to study the change of Marple-Hess prism's transmittance with the incident angle observed in the experiment, all parameters related the prism are put in the mathematical model of three-point coaxial system. The Fresnel formula and multiple-beam interference theory are used to study the interference's effect on the transmittance in detail which is caused by first order beam and other order beams produced by reflection of air gap. A precise transmittance formula is deduced which can explain the phenomena that transmittance undulates periodically along with the plane incident angle's continuous change in the experiment. The theoretical curves of transmittance undulating with azimuth angle is also drawn, which indicate that the change of transmittance with azimuth angle is periodical, and the frequency and amplitude of the transmittance's fluctuation increase with the increase of plane incident angle's absolute value.

Key word: physical optics; Marple-Hess prism; transmittance; azimuth angle; plane incident angle

1 引 言

马普-赫斯(Marple-Hess)棱镜于 1960 年由马普提出,它采用天然双折射晶体冰洲石制作而成,是一种三元结构的偏光器件。它实际上是复合的格兰-泰勒棱镜。马普-赫斯棱镜作为偏光技术中的一个重要器件,已有的文章和资料对它的各项技术指标都做过一些研究^[1,2],表明它的视场角比格兰-泰勒棱镜的要大,这就使得它在航天遥感领域^[3]、海洋激光测深系统^[4]以及微弱激光辐射探测^[5]等领域的使用中具有巨大的潜力。

光强透射比也是偏光器件的一个重要的参量之一。近年来随着国民经济的发展军事实力的增强,

偏光器件广泛应用于大气探测、地球资源调查、军事领域等许多方面的遥感仪器中。在这些领域的使用中,共同关注的问题就是光束的扫描和器件的旋转使用中偏光器件光强透射比的大小及其随光线入射角变化的情况^[6~9],这就使得对于这个问题的研究具有重要的现实意义,而已发表的文章多针对的是格兰-泰勒棱镜和格兰-傅科棱镜^[10~12],对马普-赫斯棱镜透射比随光的入射角变化还未见有文献报导,本文就着重对这一问题进行研究。

2 实验现象

马普-赫斯棱镜的整体结构如图 1 所示,晶体光

作者简介: 毕 佳(1980-),女,山东威海人,硕士研究生,主要从事偏光器件与测试方面的研究。

E-mail: bijia8880631@163.com

收稿日期: 2006-01-10; 收到修改稿日期: 2006-06-15

轴(双箭头)平行于入射端面法线和切割面法线所确定的平面, S 是棱镜的结构角。为了研究马普-赫斯棱镜的透射比随入射角的变化规律, 我们搭建如图 2 所示的实验平台。图中 1 为输出波长为 670 nm 的半导体激光器, 2 为光阑, 3 为 OE 双输出棱镜, 4 与 7 是两个完全相同的光功率计, 5 为马普-赫斯棱镜样品, 6 为测角仪。

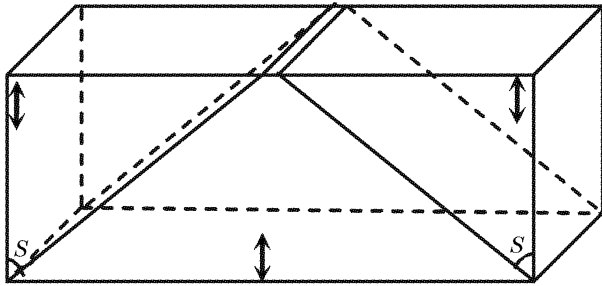


图 1 马普-赫斯棱镜的整体结构

Fig. 1 The whole structure of Marple-Hess prism

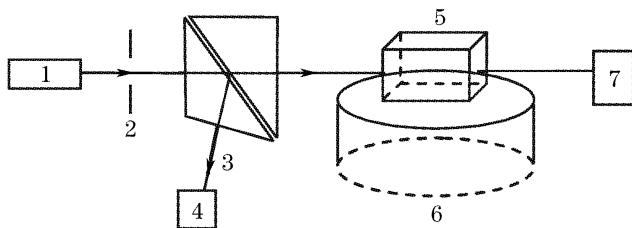


图 2 实验装置

Fig. 2 Experimental setup

在样品未置入的情况下接通电源调整光路。首先调整 OE 双输出棱镜的方位角(以入射光线为轴旋转棱镜), 使得两光功率计显示的光强相同; 然后将马普-赫斯棱镜置于测角仪, 使光线正入射到棱镜上。待激光器输出光源稳定后, 缓慢地旋转测角仪平台, 使光在马普-赫斯棱镜上的入射角在 $-3^\circ \sim 3^\circ$ 的微调范围内连续变化, 并同时注意光功率计 7 上的数值变化, 记录下每个极值出现时光功率计 7 和

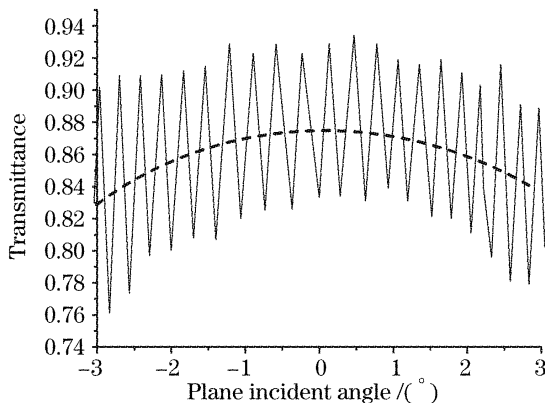


图 3 ($\varphi=0^\circ$)透射比与平面入射角关系的实验曲线

Fig. 3 Testing curve ($\varphi=0^\circ$) transmittance versus plane incident angle

4 的数值 I_2 和 I_1 以及此时对应的入射角度 i_0 。将每组 I_2/I_1 与其对应的 i_0 输入计算机, 作出其变化曲线如图 3 所示。由图 3 可见, 马普-赫斯棱镜的透射比在保持整体趋势 $i_0=0^\circ$ 时最大, $|i_0| \neq 0^\circ$ 时变小(图中虚线所示)的基础上, 呈现明显的周期性波动。为了说明这一实验现象我们做如下理论分析。

3 理论分析

由于马普-赫斯棱镜可看作是由两个完全相同的格兰-泰勒棱镜组合而成的。因而光通过它后其透射比 T 应由四部分组成: 前后两端面的透射比 T_1, T_4 以及光通过两个空气层的透射比 T_2, T_3 , 即

$$T = T_1 T_2 T_3 T_4, \quad (1)$$

考虑到我们所讨论的光的入射角范围比较小 ($-3^\circ \sim 3^\circ$), 所以根据菲涅耳公式^[13,14] 容易得出

$$T_1 = T_4 = \frac{4n_e}{(1+n_e)^2}, \quad (2)$$

光通过两个空气层的透射比则不可以简单地应用菲涅耳公式。马普-赫斯棱镜有两个空气隙胶合层, 其胶合晶面的光洁度和平面度相当好, 且空气隙层是等厚的, 这就不可避免的在两表面上发生反射, 从而引起反射光束和透射光束的干涉。我们认为它就是造成实验中透射比周期性波动的主要因素。

图 4 是光通过马普-赫斯棱镜胶合面间空气隙的示意图。设空气隙的厚度为 h , 入射角为 i , 折射角为 θ , 则每相邻两透射光的相位差为

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} nh \cos \theta, \quad (3)$$

设入射光电矢量复振幅为 $E^{(i)}$, 反射和折射光波电矢量复振幅分别为 $E^{(r)}$ 和 $E^{(t)}$ 。光束自晶体进入空气隙时透射振幅比为 t , 反射振幅比为 r 。光束自空气隙进入晶体时为 t' 和 r' , 则每束透射光在 M 平面上的复振幅为

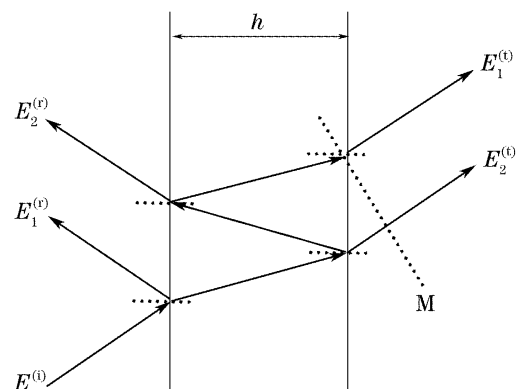


图 4 空气隙间光的反射与干涉

Fig. 4 Reflection and interference of light in the air gap

$$\begin{cases} E_1^{(i)} = tt'E^{(i)}, \\ E_2^{(i)} = r'^2 tt'E^{(i)} \exp(-i\delta), \\ \dots\dots \\ E_p^{(i)} = r'^{2(p-1)} tt'E^{(i)} \exp[-i(p-1)\delta], \end{cases} \quad (4)$$

叠加后透射光的复振幅为

$$E^{(i)} = E_1^{(i)} + E_2^{(i)} + \dots + E_p^{(i)}, \quad (5)$$

由此得光强透射比

$$\frac{I_t}{I_0} = \frac{(1-R)^2}{(1-R)^2 + 4R \sin^2(\delta/2)}, \quad (6)$$

其中光强反射比 R 可由菲涅耳公式给出:

$$R = \left(\frac{n_e \cos \theta - n \cos i}{n_e \cos \theta + n \cos i} \right)^2, \quad (7)$$

式中 θ, i 与光线在晶体入射端面上的关系我们不妨从普通情形入手分析,即当光以空间任意角度入射时,入射角应包括平面入射角 i_0 与方位角 φ 两部分。建立如图 5 所示的几何模型。图中 S 对应棱镜的结构角;与 z 轴重合的 n_1 为入射端面法线。 n_2 为空气隙界面的法线, n' 为入射端面上折射光波法线方向。为方便起见,在以下分析中我们对角度的正负做如下约定:1) 在主截面内从光线(光波)到介面法线逆时针形成的角为正,顺时针为负。2) 以 $yo z$ 平面为界, x 轴正区角度为正,负区角度为负。由图中几何关系可知

$$\cos i = \cos S \cos i_1 + \sin S \sin i_1 \cos \varphi, \quad (8)$$

又根据折射定律有

$$\sin i_0 = n_e \sin i_1, \quad n_e \sin i = n \sin \theta, \quad (9)$$

由(8)式、(9)式且令

$$A = \cos S \sqrt{n_e^2 - \sin^2 i_0} + \sin S \sin i_0 \cos \varphi$$

得

$$\cos i = A/n_e, \quad \cos \theta = \sqrt{n^2 - n_e^2 + A^2}/n, \quad (10)$$

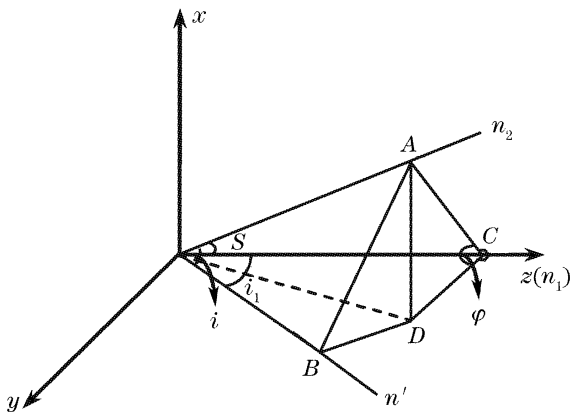


图 5 入射端面法线、折射光波法线、空气隙界面法线相对位置的几何模型

Fig. 5 Geometric model of polarized light passing through a polarizer

将(10)式代入(7)式有

$$R = \left[\frac{n_e^2 \sqrt{n^2 - n_e^2 + A^2} - n^2 A}{n_e^2 \sqrt{n^2 - n_e^2 + A^2} + n^2 A} \right]. \quad (11)$$

同理对于马普-赫斯棱镜的后一个空气隙,不妨设入射角为 i' , 折射角为 θ' , 整个几何模型将移至坐标系的 $(-x, -y, z)$ 区, 由同样的方法, 我们可得透过空气隙每相邻两束光的相位差为:

$$\delta' = 4\pi n h \cos \theta' / \lambda_0, \quad (12)$$

后一个空气隙界面的反射比 R' 为

$$R' = \left[\frac{n_e^2 \sqrt{n^2 - n_e^2 + B^2} - n^2 B}{n_e^2 \sqrt{n^2 - n_e^2 + B^2} + n^2 B} \right], \quad (13)$$

式中 $B = \cos S \sqrt{n_e^2 - \sin^2 i_0} - \sin S \sin i_0 \cos \varphi$ 。

最终得出光透过马普-赫斯棱镜后其光强透射比为^[15]

$$T = \frac{16n_e^2}{(1+n_e)^4} \frac{1}{1 + [4R/(1-R)^2] \sin^2(\delta/2)} \times \frac{1}{1 + [4R'/(1-R')^2] \sin^2(\delta'/2)}, \quad (14)$$

由(14)式可以看出当棱镜的结构角 S 和入射光波长确定后, 透射比 T 只是平面入射角 i_0 和方位角 φ 的函数。

3.1 透射比随平面入射角的波动

当方位角 φ 为定值时, 透射比就仅仅是平面入射角的函数。我们不妨设 $\varphi = 0^\circ$, 即入射角在主截面内变化, 这也是我们实验所选取的角度。将参量 $\lambda = 670 \text{ nm}$, $n_e = 1.483$, $S = 37.60^\circ$, $n = 1$, $h = 26 \mu\text{m}$ 代入(14)式, 由计算机绘出其透射比随平面入射角变化的曲线如图 6 所示。将理论曲线与实验曲线比较可见: 1) 理论曲线与实验曲线变化规律是吻合的, 即在整体先变大后变小的趋势上有周期性的波动现象。2) 理论曲线比实验曲线更光滑, 这主要是

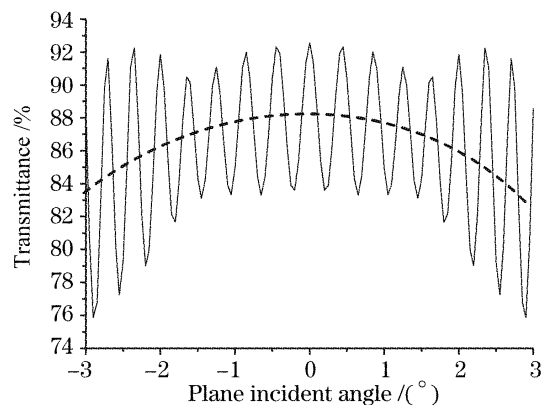


图 6 $\varphi = 0^\circ$ 透射比与平面入射角关系的理论曲线

Fig. 6 Theoretical curve of $\varphi = 0^\circ$ transmittance versus plane incident angle

因为实验中只选取了极值点的角度值,且手动操作难免有误差。

3.2 透射比随方位角的波动

当平面入射角为定值时,透射比就仅是方位角的函数。分别取 $i_0 = \pm 0.5^\circ, \pm 1.5^\circ$, 将 $\lambda = 670 \text{ nm}, n_e =$

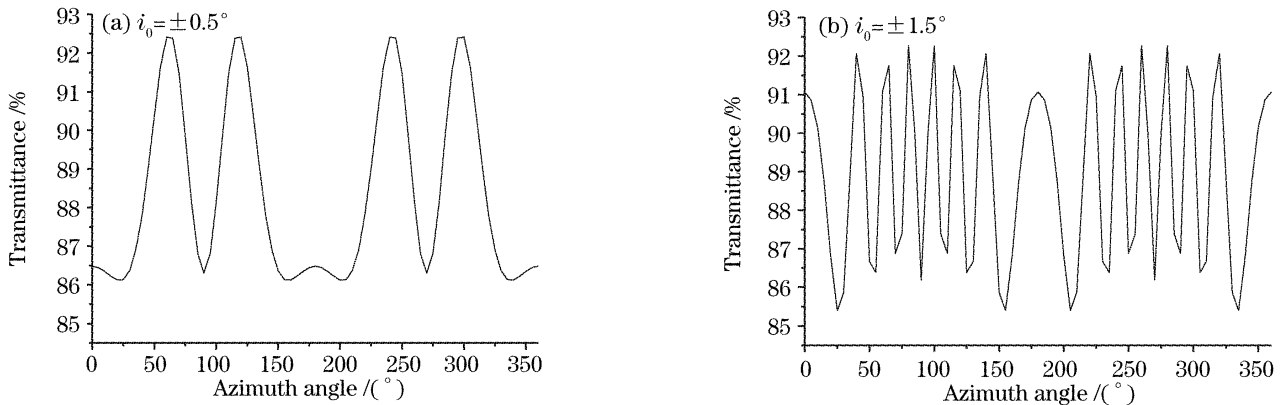


图 7 透射比与方位角关系的理论曲线

Fig. 7 Theoretical curve of transmittance versus azimuth angle

4 结 论

对马普-赫斯棱镜透射比入射角效应的实验测试和理论分析表明:

1) 马普-赫斯棱镜的透射比随光的入射角波动。

2) 当光的入射角在棱镜的主截面内变化(即方位角 φ 为定值,平面入射角 i 变化)时,透射比在整体趋势 $i = 0^\circ$ 时最大, $|i| \neq 0^\circ$ 变小的基础上波动;比较格兰-泰勒棱镜的透射比随入射角单调波动的变化趋势^[10,11],说明马普-赫斯棱镜的透射比受光的入射角的影响比格兰-泰勒棱镜小。

3) 入射光的方位角对棱镜透射比影响的大小取决于光的平面入射角,透射光强波动频率和波动幅度均随平面入射角绝对值的增大而增大。这就提示我们,在旋转使用马普-赫斯棱镜时,光的入射角越小透射比越稳定。

4) 这些现象及规律提示我们:马普-赫斯棱镜在一些要求视场角较大,光强透射比稳定的应用技术中,比格兰-泰勒棱镜更有优势。

参 考 文 献

- Li Jingzhen. *Optics Manual* [M]. Shanxi: Science Tech Publishing House Of Shanxi, 1986. 517~518 (in Chinese)
李景镇. 光学手册[M]. 陕西: 陕西科学技术出版社, 1986. 517~518
- Li Guohua, Wu Fuquan. Study of some problems about Marple-Hess prisms[J]. *J. Qufu Normal University*, 1988, **14**(3): 39~43 (in Chinese)
李国华, 吴福全. 马普-赫斯棱镜几个问题的研究[J]. 曲阜师范大学学报, 1988, **14**(3): 39~43

1. 483, $S = 37.60^\circ, h = 26 \mu\text{m}, n = 1$ 代入(14)式,由计算机绘出透射比随方位角变化的关系曲线如图 7。由图可见: 1) 当平面入射角 $i_0 \neq 0$ 时,马普-赫斯棱镜的透射比随方位角波动; 2) 透射光强波动频率和波动幅度均随平面入射角绝对值的增大而增大。

- Chang Jun, Jiang Huilin, Weng Zhicheng *et al.*. Design of wide angle space optical systems of long focal length [J]. *Acta Armamentar*, 2003, **24**(1): 42~44 (in Chinese)
常 军, 姜会林, 翁志成 等. 大视场、长焦距空间光学系统的设计 [J]. 兵工学报, 2003, **24**(1): 42~44
- Wang Quandong, Chen Weibiao, Lu Yutian *et al.*. Analysis of relationship between parameter choice of airborne laser bathymetry and maximum penetrability [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1255~1260 (in Chinese)
王权东, 陈卫标, 陆雨田 等. 机载海洋激光测深系统参量设计与最大探测深度能力分析 [J]. 光学学报, 2003, **23**(10): 1255~1260
- Mao Dengsen, Zhang Jilong. The application of tenuity laser radiation detecting technology in the laser warning devices [J]. *J. Test And Measurement Technology*, 2004, **18**(4): 373~376 (in Chinese)
毛登森, 张记龙. 微弱激光辐射探测技术在激光告警设备中的应用 [J]. 测试技术学报, 2004, **18**(4): 373~376
- Shao Weidong, Wang Peigang *et al.*. Study on multichannel spectropolarimeter technology [J]. *Infrared Monthly*, 2000, (9): 7~11 (in Chinese)
邵卫东, 王培纲 等. 多通道分光偏振计技术研究 [J]. 红外月刊, 2000, (9): 7~11
- Wang Chunyong, Jin Weiqi. Some problems on the calculation of atmospheric transmission characteristics in the analysis of optico-electronic imaging system [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2003, **23**(5): 617~637 (in Chinese)
王春勇, 金伟其. 光电成像系统分析中大气传输特性计算的几个问题 [J]. 北京理工大学学报, 2003, **23**(5): 617~637
- Zhao Dazun, Fang Junyong. Determinaton of assembling tolerances of optical imaging systems by the use of wave optics [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2003, **23**(4): 457~460 (in Chinese)
赵达尊, 方俊永. 波动光学应用于成像光学系统装配公差确定 [J]. 北京理工大学学报, 2003, **23**(4): 457~460
- Shao Weidong, Wang Peigang. Terrain remote sensing principle and primary scheme of rolling cloudy [J]. *Infrared Monthly*, 2002, (8): 1~3 (in Chinese)
邵卫东, 王培纲. 卷云的地面遥感原理与初步方案 [J]. 红外月刊, 2002, (8): 1~3
- Zhu Huaifeng, Song Lianke, Wu Fuquan *et al.*. Cause of "minute

- fluctuation" on the transmission curve of Taylor polarizing prism [J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(1): 41~44 (in Chinese)
朱化凤,宋连科,吴福全. 泰勒检偏棱镜透射比随旋转角周期“抖动”的理论分析[J]. 中国激光, 2004, **31**(1): 41~44
- 11 Li Hongxia, Wu Fuquan, Fan Jiyang. An analytical study on modulated intensity's perturbation for the polarizing prisms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1456~1459 (in Chinese)
李红霞,吴福全,范吉阳. 偏光棱镜调制器调制光强扰动的理论分析[J]. 光学学报, 2003, **23**(12): 1456~1459
- 12 Liu Houtong, Li Guohua, Ren Guangjun *et al.*. Theoretical research of effect of crystal membranous layers on light transmission of polarizing prism[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1143~1147 (in Chinese)
刘厚通,李国华,任广军等. 晶体膜层效应对棱镜偏光镜透射比影响的理论研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(8): 1143~1147
- 13 Liao Yanbiao. *Polarized Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2003. 19~23 (in Chinese)
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学技术出版社, 2003. 19~23
- 14 Li Guohua. *Optics* [M]. Ji'nan: Educational Publishing House of Shandong, 1991. 159~164 (in Chinese)
李国华. 光学[M]. 济南: 山东教育出版社, 1991. 160~164
- 15 M. Born, E. Wolt. *Principles of Optics* (Volume one)[M]. Beijing: Science Press, 1978. 64~65 (in Chinese)
M. 波恩, E. 沃耳夫. 光学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1978. 64~65



2007 亚洲光电子国际会议(Photonics Asia 2007)11 月将在京召开

由中国光学学会和国际光学工程学会(SPIE)联合举办的 2007 亚洲光电子国际会议(Photonics Asia 2007)将于 2007 年 11 月 11~15 日在中国北京召开。

大会主席是中国光学学会理事长周炳琨院士和 2007SPIE 主席 Mr. Brian Culshaw。王大珩院士和母国光院士担任大会名誉主席。

亚洲光电子会议是亚洲最大的光学、光电子学学术交流和产业交流的盛会。会议将对学科的最新发展趋势、技术应用、产品发布、市场分析、投资调研等各类问题进行广泛的讨论和交流。会议将举行大会特邀报告、专题报告和高层专家报告会,会议附设光学和光电子学最新成果展览。

会议共设如下 22 个专题。

- | | |
|---|--|
| PA01: High Power Lasers | Dianyuan Fan |
| PA02: Semiconductor Lasers and Applications | Hong Hou |
| PA03: Laser in Material Processing and Manufacturing | Shusen Deng, Xiao Zhu |
| PA04: Optics in Health Care and Biomedical Optics | Xingde Li, Qingming Luo |
| PA05: Quantum Optics and Applications in Computing and Communications | Guangcan Guo, Songhao Liu |
| PA06: LED Materials and Devices | Chuangtian Chen, Jian Wang |
| PA07: Advanced Materials and Devices for Sensing and Imagine | Anbo Wang, Yimo Zhang |
| PA08: Advanced Sensor Systems and Applications | Yun Jiang Rao, Yan Biao Liao, Gang Ding Peng |
| PA09: Nanophotonics, Nanostructure and Nanometrology | Xing Zhu |
| PA10: Holography, Diffractive Optics and Applications | Yunlong Sheng, Dahsiung Hsu, ChongXiu Yu |
| PA11: Electronic Imaging and Multimedia Technology | Liwei Zhou |
| PA12: Optical Design and Testing | Yongtian Wang |
| PA13: Advances in Optical Data Storage Technology | Guofan Jin |
| PA14: Infrared Technologies and Applications | Yi Cai, Haimei Gong |
| PA15: MEMS/MOEMS Technology and Applications | Zhaoying Zhou, Yuelin Wang |
| PA16: Information Optics and Photonics Technology | Guoguang Mu, Feijun Song |
| PA17: Optoelectronic Devices and Integration | Xuping Zhang, Hai Ming |
| PA18: Advanced Microlithography Technology | Jinfeng Kang, Jun-en Yao |
| PA19: Nonlinear Optics and Applications | Yiping Cui, Qihuang Gong |
| PA20: Terahertz Photonics | Chunlin Zhang |
| PA21: Solar Energy Technology and Application | Yuwen Zhao, Nuofu Chen |
| PA22: Solid state lighting | Jinmin Li, Ling Wu Yubo Fan |

会议论文将通过专家审稿,录用的文章将收录到 SPIE 论文集中。该论文集将被 EI, INSPEC, ISI, AIAA 以及其他重要学术检索刊物检索。

在线投稿网站 www.spie.org。提交摘要和论文需同时发送到电子邮箱 photoasia2007@gmail.com, 邮件主题按照“专题号码-作者中文姓名-论文标题”编写。会议摘要截稿日期 2007 年 6 月 5 日。

会议国内网站: www.coscn.org

联系人: 翟林 zhailin@hotmail.com Tel: 010-62641108, 13651149955

李翠玲 cuilingli@bit.edu.cn Tel: 010-68912564, 13521121045

丁伯瑜 dingboyu@sohu.com Tel: 010-68912564, 13661197335

通信地址: 100081 北京海淀区中关村南大街 5 号北京理工大学光电工程系 李翠玲 丁伯瑜