

文章编号: 0253-2239(2008)08-1596-05

一种新型组合单元频率选择表面

贾宏燕^{1,2} 高劲松¹ 冯晓国¹ 孙连春¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 为了实现频率选择表面(FSS)的平顶传输特性,选取矩形栅格和传统圆环的组合图形为基本单元,设计了一种新型组合图形单元的 FSS。利用谱域法对这种新型 FSS 的单屏结构进行理论计算和分析。计算结果表明,这种新型的 FSS 单屏结构能够给出陡峭边缘和平顶的宽频带传输特性,平顶带宽可达 8 GHz;同时能够把相邻很近的信号带分离开从而实现双重通信,例如在 X 波段和 Ku 波段的信号,并且对不同入射角度的电磁波保持稳定的双带特性。

关键词 表面光学; 频率选择表面(FSS); 组合单元; 谱域法; 入射角

中图分类号 TN713 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS20082808.1596

Novel Composite Element Frequency Selective Surface

Jia Hongyan^{1,2} Gao Jinsong¹ Feng Xiaoguo¹ Sun Lianchun¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to realize flat-top transmission property for frequency selective surface (FSS) structure, a novel composite element FSS composed of rectangle metal grid and conventional ring loop element is presented. By applying the spectral-domain approach, the novel free FSS screen is calculated and analyzed theoretically. As a result of the numerical analysis, it is shown that the flat-top passband of 8 GHz and sharper skirts, diplexing closely separated signal bands, for example, X- and Ku-band signals, can be obtained with the novel structures. In addition, the performance of double bands available can maintain stable for different incidence angles.

Key words surfaces optics; frequency selective surface (FSS); composite element; spectral-domain approach; incident angles

1 引 言

近几年周期结构^[1~4]的物理性质和应用得到了人们的极大关注,比如频率选择表面(FSS)和光子带隙结构材料。频率选择表面是一种空间滤波器,与电磁波相互作用表现出明显的带通或带阻的滤波特性^[5],它是由周期性排列的金属贴片单元或金属屏上周期性的开孔单元构成的一种二维周期阵列结构,因其具有特定的频率选择作用而广泛地应用于微波^[6]、红外直至可见光波段^[7]。

描述 FSS 频率响应特性的主要指标有中心频率、中心频率处的透射率、传输带宽等。FSS 谐振图形单元是影响频率响应特性的主要因素之一,已有报道通过选取图形单元(包括单一图形单元以及组合图形单元)可得到理想传输特性的方法^[8~13],但是这些传统的 FSS 设计通常通带带宽很窄、通带边缘平缓。

FSS 的理论分析方法很多,有 R. J. Luebbers 等^[14]的模式匹配法、T. K. Wu 等^[15]应用的谱域分

收稿日期: 2007-12-27; 收到修改稿日期: 2008-03-10

基金项目: 中国科学院国防创新基金(CXJJ-149)资助课题。

作者简介: 贾宏燕(1980-),女,博士研究生,主要从事薄膜光学与频率选择表面设计等方面的研究。

E-mail: jiayanzi0928@126.com

导师简介: 高劲松(1968-),男,研究员,博士生导师,主要从事薄膜光学与镀膜、光刻及隐身技术等方面的研究。

E-mail: gaojs@ciomp.ac.cn

析模型和 R. J. Langley 等^[16]应用的等效电路方法等。本文设计了一种新型组合图形单元 FSS 模型, 采用谱域法对组合图形单元 FSS 结构进行分析。

2 谱域法分析

2.1 模型

等间距的两组平行金属线垂直交叉排列, 组成一个金属网栅结构。这种网栅结构具有屏蔽低频电磁波而透射高频电磁波的传输特性, 通常称为高通滤波器^[17]。

圆环形金属贴片周期排列, 是一种带阻型 FSS 结构, 在谐振频率点入射电磁波全反射, 其他频率电磁波全部透射, 从而具有很好的带阻滤波特性, 如图 1 所示。

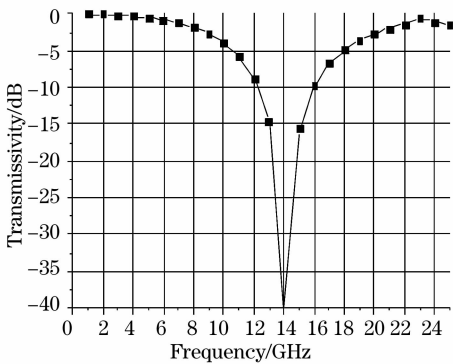


图 1 圆环单元 FSS 频率响应曲线

Fig.1 Frequency response of the ring element FSS

在金属网栅结构的基础上, 每一个网格中心位置放置圆环金属贴片, 构成了新型组合图形单元的 FSS 结构, 如图 2 所示, 组合图形的参量为导线宽 W_1 , 间隔 P ; 圆环金属贴片内半径 R_{in} , 金属贴片宽度 W_2 。这是一种把高通滤波器与传统的频率选择表面组合的新型 FSS。

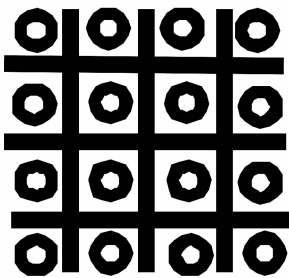


图 2 新型单元 FSS 结构

Fig.2 FSS structure with novel elements

2.2 计算方法及过程

利用谱域法分析 FSS 结构电磁散射问题, 第一

步把 FSS 的散射场及入射场与屏上的表面感应电流建立联系。理想导体单元分布在 XY 平面, 首先建立单个周期单元(高通滤波器的单元选取每个网格中心线内的导线部分、传统 FSS 结构选取圆环贴片、新型组合结构的单元选取网格导线中心线内包括金属导线和圆环贴片的部分, 如图 3 所示)的积分方程, 然后修改为整个周期阵列的积分方程。

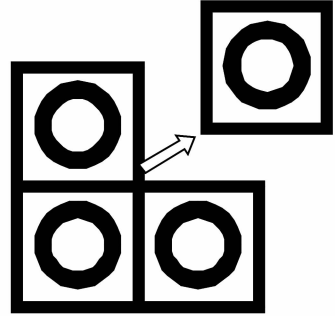


图 3 计算时所选取的单元

Fig.3 Element for the calculation

入射平面波在 XY 平面上产生的自由空间的散射场, 可以通过计算贴片上的感应电流来得到。源 r 在点 r' 处的散射场为

$$\mathbf{E}^s = -j\omega\mu_0\mathbf{A} + \frac{1}{j\omega\epsilon_0}\nabla(\nabla\cdot\mathbf{A}), \quad (1)$$

式中

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \int G(\mathbf{r}, \mathbf{r}')\mathbf{J}(\mathbf{r}')d\mathbf{r}' = G * \mathbf{J}, \quad (2)$$

$*$ 为卷积运算, \mathbf{J} 为导体的感应表面电流, G 为自由空间格林函数。在导体贴片单元表面利用电场的边界条件, 得到切向电场

$$\mathbf{E}_t = \mathbf{E}_t^s + \mathbf{E}_t^i = 0, \quad (3)$$

式中上标 s, i 分别对应散射场和入射场

$$\mathbf{E}_t^i(x, y) = j\omega\mu_0\mathbf{A}(x, y) - \frac{1}{j\omega\epsilon_0}\{\nabla[\nabla\cdot\mathbf{A}(x, y)]\}_t, \quad (4)$$

(4)式是单个单元的电场积分方程。对于无穷薄平面只有 A_x 和 A_y 不为零。(4)式写成矩阵形式:

$$-\begin{bmatrix} E_x^i \\ E_y^i \end{bmatrix} = -j\omega\mu_0 \begin{bmatrix} k_0^2 + \frac{\partial^2}{\partial x^2} & \frac{\partial^2}{\partial x\partial y} \\ \frac{\partial^2}{\partial x\partial y} & k_0^2 + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式时 $A_x = G * J_x$, $A_y = G * J_y$, k_0 为波数。

可以用 $G * \mathbf{J} \leftrightarrow \tilde{G}\tilde{\mathbf{J}}$ 、 $\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial x} \leftrightarrow j\alpha\mathbf{A}$ 、 $\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial y} \leftrightarrow j\beta\mathbf{A}$ 来代替

(5)式出现的卷积以及部分导数。进行傅里叶变换后得到

$$-\begin{bmatrix} E_x^i(x,y) \\ E_y^i(x,y) \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \begin{bmatrix} k_0^2 - \alpha^2 & -\alpha\beta \\ -\alpha\beta & k_0^2 - \beta^2 \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{G}} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{J}}_x \\ \tilde{\mathbf{J}}_y \end{bmatrix} \exp(j\alpha x) \exp(j\beta y) d\alpha d\beta, \quad (6)$$

当 $k_0^2 > \alpha^2 + \beta^2$ 时, $\tilde{\mathbf{G}} = \frac{-j}{2\sqrt{k_0^2 - \alpha^2 - \beta^2}} \mathbf{I}$, \mathbf{I} 为单位张量; 其他情况下 $\tilde{\mathbf{G}} = \frac{1}{2\sqrt{\alpha^2 + \beta^2 - k_0^2}} \mathbf{I}$.

对于周期结构, 满足费洛盖 (Floquet) 定理, 可以把谱域法推广到周期阵列贴片:

$$J(x) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \tilde{\mathbf{J}}_m \exp[j(2m\pi/a + k_x^i)x], \quad (7)$$

式中 a 为 x 方向上周期。在 y 方向上的入射波和周期分别做相同的处理 (b 为 y 方向的周期), (6) 式可写为

$$-\begin{bmatrix} E_x^i(x,y) \\ E_y^i(x,y) \end{bmatrix} = \frac{2\pi}{j\omega\epsilon_0 ab} \sum_{\alpha_m} \sum_{\beta_n} \begin{bmatrix} k_0^2 - \alpha_m^2 & -\alpha_m\beta_n \\ -\alpha_m\beta_n & k_0^2 - \beta_n^2 \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{G}}(\alpha_m, \beta_n) \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{J}}_x(\alpha_m, \beta_n) \\ \tilde{\mathbf{J}}_y(\alpha_m, \beta_n) \end{bmatrix} \exp(j\alpha_m x) \exp(j\beta_n y), \quad (8)$$

式中

$$\alpha_m = \frac{2m\pi}{a} + k_x^i, \quad \beta_n = \frac{2n\pi}{b} + k_y^i,$$

用矩阵法求解 (8) 式, 基函数选用子域基函数中的 Rooftop 函数^[18], 就可求出表面电流, 进而可以求出 FSS 结构的反射系数和透射系数。

3 结果分析与讨论

3.1 陡峭边缘和平顶特性

在 1~18 GHz 频段范围内, 针对横电入射波计算组合单元 FSS 结构的传输系数, 步长为 1 GHz。参量取值分别为: 网栅线宽为 $W_1 = 0.156$ mm, 导线间隔为 $P = 10$ mm, 圆环金属贴片内半径为 $R_{in} = 2.8$ mm, 金属贴片宽度为 $W_2 = 0.7$ mm。实际应用中照射在 FSS 结构上的角度范围大, 入射波入射角度分别取 0° 、 15° 、 30° 和 40° 。对 FSS 阵列结构进行计算和分析, 得到各个入射角度下的频率响应特性曲线, 如图 4 所示。由于导线网格阵列屏蔽低频电磁波、透过高频电磁波, 同时圆环贴片阵列又有相对较窄带宽的滤波特性 (图 1), 两种图形的组合单元

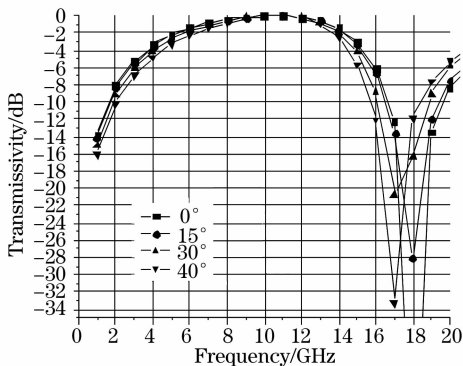


图 4 不同入射角时新型 FSS 的频率响应曲线
Fig. 4 Frequency response of novel FSS for different incidence angles

的 FSS 表现出了一种兼具高通和阻带的特性。

新的特性并不只是两种结构特性的简单叠加, 以电磁波正入射的情况为例进行分析。入射电磁波使得 FSS 的金属表面产生感应电流, 作为组合单元的金属网栅和圆环贴片上的感应电场会发生耦合作用。在耦合作用的影响下, 圆环贴片决定的阻带谐振频率向高频漂移, 由原来的 14 GHz 变化为 18 GHz; 同时金属网栅结构决定的高通特性有相反的向低频漂移的倾向, -2 dB 透射率的频点由原来的 6 GHz 向低频漂移到 4.8 GHz。而对于整个 FSS 结构, 低频点的传输特性主要取决于网格单元, 阻带谐振点的频率主要受到圆环贴片的影响。

图 4 中, 0° 入射角 (即正入射) 时 -2 dB 传输损耗处的带宽为 9 GHz, 明显地给出了宽带宽和边缘陡峭的特性。并且在考虑到 TE 波大范围角度 (15° 、 30° 、 40°) 入射情况下, 频率响应特性比较稳定。入射角度越大边缘陡峭特性越明显, 带宽略有变小, 这种特性与传统的 FSS 结构相似。

在实际的工程应用中, 平顶带宽宽度范围的要求不同。由于阻带的谐振频率主要受圆环贴片阵列

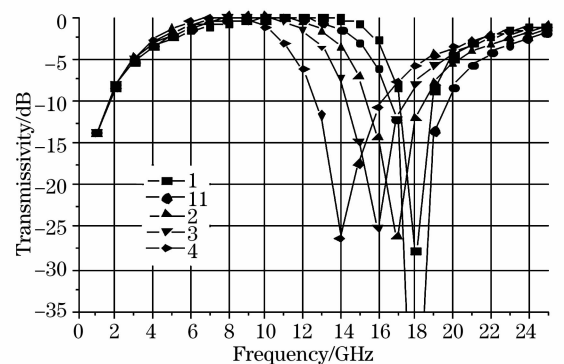


图 5 调整圆环单元参量时新型 FSS 结构的频率响应曲线
Fig. 5 Frequency response of novel FSS for different ring element parameters

的影响,因此可以通过调整圆环贴片的参量改变阻带的谐振频率,从而调整组合单元 FSS 透波系数曲线的带宽。图 5 给出了组合单元 FSS 在调整圆环参量时频率响应特性的变化规律。由表 1 可见,随着圆环贴片单元内半径的变大,传输损耗小于 -1 dB

表 1 不同圆环单元参量时 FSS 的频率响应特性

Table 1 Frequency response of FSS with different ring element parameters

Structure	R_{in}/mm	Ring width /mm	Passband width /GHz	Stopband frequency /GHz
1	2.8	0.7	8	18
11	2.8	0.2	7	18
2	3	1	6	17
3	3.2	0.7	5	16
4	3.4	1	3	14

3.2 可利用的双带特性

新型组合单元 FSS 还具有可应用高透射通带和高反射阻带的双带特性。组合单元 FSS 结构设置参量为: $W_1=0.156$ mm, $P=10$ mm, $R_{in}=3.4$ mm, $W_2=1.1$ mm。

图 6 给出了 TE 入射波频率响应曲线,由图 6 可见,组合单元 FSS 结构能够把 $8\sim 9$ GHz(在 X 波段)和 $13.5\sim 15.5$ GHz(在 Ku 波段)的两个相邻波段信号分离开。使用这种组合单元 FSS 的天线系统,可以使得 X 波段信号透过(不低于 -0.5 dB),而同时反射(不高于 -13 dB)Ku 波段信号,从而实现双波段通讯。并且在考虑到角度变化的情况(15° 、 30° 、 40°)时,X 波段的高透过和 Ku 波段的高反射仍然保持不变,仅仅在大角度时反射率有微弱的下降,但仍不高于 -13 dB。组合单元 FSS 还可以通过合理调整单元的参量,实现其它波段的双波段通讯。

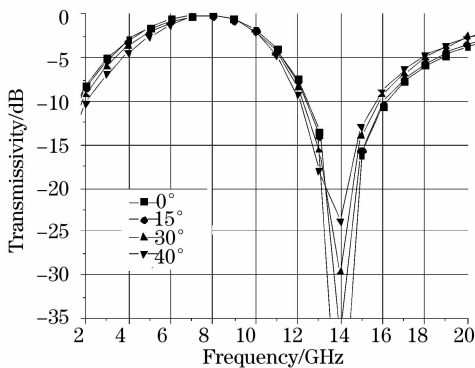


图 6 新型单元 FSS 的双波段特性

Fig. 6 Double-band property of the novel element FSS

4 结 论

通过把高通滤波器和传统频率选择表面单元相

时的平顶带宽逐渐减小;阻带频点逐渐向低频移动。由表 1 中结构 1,11 的比较可见,在圆环贴片单元内半径保持不变而调整圆环宽度时,随着宽度变小,带宽变小,但阻带的频点没有改变,仅仅是阻带的深度下降。

结合,给出了一种新型组合单元的频率选择表面结构。应用谱域法对组合单元的频率选择表面结构进行了计算,结果表明这种新型的 FSS 结构具有快速下降边缘和平顶特性以及可利用的双带特性,并且在大角度情况下特性仍然保持不变。

参 考 文 献

- Dong Xiaowei, Pei Li, Jian Shuisheng. Transfer matrix method for analyzing the characteristics of multiple-ring higher order microring resonators[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(7): 929~932
- 董小伟,裴丽,简水生. 传输矩阵法分析多环高阶谐振滤波器特性[J]. *中国激光*, 2005, **32**(7): 929~932
- Zhang Xiaobei, Huang Dexiu, Hong Wei et al.. Transfer matrix method for analyzing transmission characteristics of microring resonator arrays[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 15851~1592
- 张小贝,黄德修,洪伟等. 传输矩阵法分析微环谐振器阵列传输特性[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1585~1592
- Hongyan Jia, Jinsong Gao, Xiaoguo Feng et al.. Frequency selective surface with a flat topped passband[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(12): 715~716
- Xiaoqi Li, Jianmin Zhou, Jinsong Gao. Analysis, fabrication, and measurement of Y aperture element frequency selective surface[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(11): 660~661
- B. A. Munk. *Frequency Selective Surface: Theory and Design* [M]. New York: Wiley, 2000
- C. C. Chen. Transmission of microwave through perforated flat plates of finite thickness[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.*, 1973, **21**(1): 1~6
- Lu Jun, Sun Guancheng, Cai Hongxing. Transmission characteristics of far-infrared frequency selective surface [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(6): 41~44
- 卢俊,孙贯成,蔡红星. 远红外频率选择表面的传输特性分析[J]. *光电工程*, 2006, **33**(6): 41~44
- He Bin, Sun Lianchun. Effects of fabricated error on transmission performance of double layer frequency selective surface configuration [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(5): 599~603
- Lu Jun. Experimental comparison of the characteristics of Y element and Y loop element [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(2): 219~224
- 卢俊. Y形和Y环形单元特性的试验对比研究[J]. *光学精密*

- 工程, 2005, **13**(2): 219~224
- 10 S. K. Ditti, S. Das. On a polarization-independent frequency selective surface (FSS)[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2005, **44**(3): 249~251
- 11 Li Xiaoli, Gao Jinsong. Effects of Y loop element FSS structure parameter on frequency response [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(6): 1070~1075
李小秋, 高劲松. Y 环单元 FSS 结构参量对频率特性的影响[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(6): 1070~1075
- 12 P. T. Teo, X.-F. Luo, C. K. Lee. Transmission of convoluted periodic loop element with selective reflection[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(9): 1454~1456
- 13 P. W. B. Au, L. S. Musa, E. A. Parker *et al.*. Parametric study of tripole and triplode loop arrays as frequency selective surfaces[J]. *IEE Proceedings*, 1990, **137**(5): 263~268
- 14 R. J. Luebbers, B. A. Munk. Mode matching analysis of biplanar slot arrays[J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1979, **AP-27**(3): 441~443
- 15 T. K. Wu. *Frequency Selective Surface and Grid Array* [M]. New York: Wiley, 1995
- 16 R. J. Langley, E. A. Parker. Double-square frequency-selective surfaces and their equivalent circuit[J]. *Electron. Lett.*, 1983, **19**(17): 675~677
- 17 Feng Xiaoguo, Feng Liang, Sun Lianchun. Characteristic dimension design and fabrication of metallic mesh[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(1): 59~64
冯晓国, 方 梁, 孙连春. 金属网栅结构参量设计与制作[J]. *光学精密工程*, 2005, **13**(1): 59~64
- 18 A. W. Glisson, D. R. Wilton. Simple and efficient numerical methods for problems of electromagnetic radiation and scattering from surfaces [J]. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 1980, **AP-28**(5): 593~603

“Code-V”杯光学设计大赛暨论坛

由中科院上海光机所主办的光学设计高级讲习班旨在提升我国光学设计人员的设计思想和理念, 培育光学大师, 目前安排的课程有光学系统设计、光机系统设计、光学薄膜、光学加工等。该高级讲习班自 2004 年由王之江院士提议举办以来, 已连续成功举办四届。第五届光学设计高级讲习班将在 2008 年 10 月举办, 同期将举办首届全国光学设计大赛和首届光学设计论坛, 《激光与光电子学进展》(核心期刊) 也将在论坛期间出版“光学设计”专刊。欢迎广大从事光学设计的人员踊跃参加。

主办单位:

中国科学院上海光学精密机械研究所

冠名单位:

Optical Research Associates

承 办:

光学期刊联合编辑部

组织委员会

共主席:

王之江 院士 上海光学精密机械研究所
薛鸣球 院士 苏州大学
朱健强 研究员 上海光学精密机械研究所

副主席:

徐文东 研究员 中国科学院上海光学精密机械研究所
Robert S. Hilbert 总裁 美国 Optical Research Associates 公司

王涌天 教授 北京理工大学
范志刚 教授 哈尔滨工业大学
岑兆丰 教授 浙江大学
邢廷文 研究员 成都光电技术研究所

委员:

杜春雷 成都光电技术研究所
孟军和 天津航技术物理研究所

沈为民 苏州大学
王小鹏 西安应用光学研究所
翁志成 长春光学精密机械与物理研究所
张 新 长春光学精密机械与物理研究所
赵葆常 西安光学精密机械研究所
金 宁 昆明物理研究所
张国瑞 北京空间机电技术研究所
杨长城 华中光电技术研究所
李 林 北京理工大学
曾吉勇 凤凰光学(上海)有限公司
王文鉴 舜宇光学科技(集团)有限公司

日程安排

公布参赛试题: 2008 年 8 月 10 日
提交参赛作品: 2008 年 9 月 10 日~10 月 10 日
检验参赛作品: 2008 年 10 月 11 日~25 日
颁奖典礼暨光学设计论坛: 2008 年 10 月 29 日

奖项设置

奖 项	奖金金额
光学设计第一名	5000 元
光学设计第二名	3000 元
光学设计第三名	2000 元
光学设计第四~第十名	1000 元

所有参赛代表均可免费参加首届光学设计论坛及首届光学设计大赛颁奖典礼, 与顶级光学设计专家面对面交流。详情请咨询(中国光学期刊网 www.opticsjournal.net)
中国科学院上海光学精密机械研究所 光学设计高级讲习班筹备组 段家喜 编辑
电话/传真: 021-69918426/021-69918098
E-mail: duanjiayi@siom.ac.cn