

文章编号 1004-924X(2009)11-2724-06

# 应用二维微硅片狭缝阵列的阿达玛光谱仪

范 玉<sup>1,2</sup>, 吴一辉<sup>1</sup>, 宣 明<sup>1</sup>, 张 平<sup>1</sup>, 周连群<sup>1,2</sup>, 庄须叶<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 为了实现对微弱信号的光谱分析, 采用 Offner 光学结构制作了高光通量高分辨率阿达玛光谱仪, 并对光谱仪入射狭缝的类型选择进行分析。利用 MEMS 加工技术制作出阿达玛微硅片狭缝阵列, 分析了入射狭缝的衍射现象, 推导出衍射后的光强分布公式。采用 Matlab 软件对光强分布进行仿真, 搭建了实验测量平台验证仿真结果。结果显示, 在相同的条件下, 阿达玛 S15 型狭缝阵列的光通量是阿达玛循环 S15 型狭缝阵列的 1.45 倍, 推导得出的衍射光强分布公式正确, 仿真方法准确, 测试方法合理, 表明阿达玛 S 型微硅片狭缝阵列适合本文设计的光谱仪。

**关键词:** 阿达玛光谱仪; 微硅片狭缝阵列; 光通量; 阿达玛 S 型狭缝阵列; 阿达玛循环 S 型狭缝阵列  
**中图分类号:** TH744.1 **文献标识码:** A

## Hadamard mini-spectrometer based on 2D multi-micro-silicon-slit matrices

FAN Yu<sup>1,2</sup>, WU Yi-hui<sup>1</sup>, XUAN Ming<sup>1</sup>, ZHANG Ping<sup>1</sup>, ZHOU Lian-qun<sup>1,2</sup>, ZHUANG Xu-ye<sup>1,2</sup>

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*  
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** In order to realize the spectral analysis of a weak signal, a Hadamard spectrometer with a high luminous flux and high resolution is established by using a Offner optical structure in the system. The performance of Hadamard S slit and Hadamard cyclic-S slit is compared. Then, the multi-micro-silicon-slit matrices are produced by MEMS technique, and the diffraction phenomenon is analysed by using the software of Matlab. Based on the diffraction theory, the diffractive formula is presented. A set of experiments are carried out to compare the performance of Hadamard S15 and Hadamard cyclic-S15, results show that the luminous flux of the presented device with Hadamard S15 is 1.45 times that of the device with Hadamard cyclic S15. The experiment verifies that the programmer using the Matlab language is reasonable, the measurement system is stable, and the S15 slit is fit for the Hadamard spectrometer.

**Key words:** Hadamard spectrometer; micro-silicon-slit matrix; luminous flux; Hadamard S slit; Hadamard cyclic-S slit

收稿日期: 2008-12-03; 修订日期: 2009-02-16.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2007AA042102); 国家 863 高技术研究发展计划 B 项目 (No. 2006AA04Z367); 吉林省科技发展基金资助项目 (No. 20060335)

## 1 引 言

目前,微小型光谱仪入射狭缝大多数采用单狭缝形式,在化学分析、医学分析等对光谱仪分辨率要求较高的情况下,通常采用减小入射狭缝尺寸等手段来实现,但这必然导致光通量严重下降,对微弱信号的分析极其不利。虽然可以通过延长探测器的采集积分时间来增强对微弱信号的读取,但延长采集积分时间会使背景噪声和探测器的固有噪声增大。因此,大多数光栅光谱仪不得不在光通量与分辨率之间进行折衷。

入射狭缝作为光谱仪中的重要元件,它的结构直接影响光谱仪的光通量与分辨率。为了改进光谱仪的这两个最重要的性能指标,目前的入射狭缝常采用多狭缝阵列结构。利用双层薄膜硅片叠加是实现多狭缝阵列结构的普遍方法,比如采用压电驱动加放大机构的方式来实现驱动,每次平移一个狭缝距离。这种实现狭缝阵列的方法对两层狭缝阵列的对准工艺要求非常苛刻,并且驱动结构复杂、精度有限,同时由于移动距离有限,限制了狭缝的个数,种种不利都限制了阿达玛光谱仪的发展<sup>[1]</sup>。

本文利用 MEMS 工艺制作的全固态阿达玛微硅片狭缝阵列制作了阿达玛光谱仪,最小狭缝单元为  $6\ \mu\text{m}$ ,因为全固态的阿达玛光谱仪仅用一次采集就可以实现阵列变换,因此完全克服了上述缺点。这种基于微硅片狭缝阵列结构的光谱仪系统有如下优点:

(1)全固态化设计,完全消除了任何移动部件带来的误差,例如,重复性差、一致性差,改善了寿命短、测量时间长等问题;

(2)采用微硅片狭缝模板<sup>[2]</sup>,具有体积小、精度高、易于批量化制作、杂散光小、同一个模板上的狭缝一致性好,同时可以根据实际光学系统的需要对狭缝进行改变等优点;

(3)由于微硅片狭缝是中空的,透过率达到 100%,可以得到很好的通光效果,并适于紫外到红外全波段。

本文设计的阿达玛光谱仪,在不降低光通量的前提下可提高分辨率,适用于微弱信号的测量,

克服了大多数光栅光谱仪的缺陷。同时本文对入射狭缝阵列衍射后的光强分布进行了理论分析,并以阿达玛 S15 型微硅片狭缝阵列和阿达玛循环 S15 微硅片型狭缝阵列为例进行了比较,实验验证了狭缝阵列结构对光谱仪光通量的影响,为阿达玛光谱仪入射狭缝的选择提供了依据。

## 2 系统光学结构

本文的阿达玛微型光谱仪光学设计采用了 Offner 光学结构,利用 ZEMAX 软件进行辅助设计。光学结构(如图 1 所示)由微硅片狭缝阵列、非球面反射镜和光栅组成。入射光通过微硅片狭缝阵列,照射到非球面反射镜上,变成平行光束,照射到光栅上,经过分光,再照射到非球面反射镜上并最终成像。

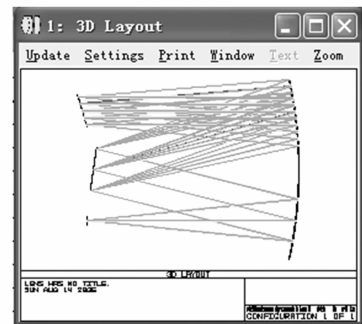


图 1 光学系统结构图

Fig. 1 Schematic diagram of optical system

通过优化光栅、反射镜的曲率半径、光学元件的离轴量和倾斜角,可以达到理想的空间光谱像面,光学系统 MTF 如图 2 所示。使用非球面反射镜可以修正球面误差,彗差可通过系统的对称

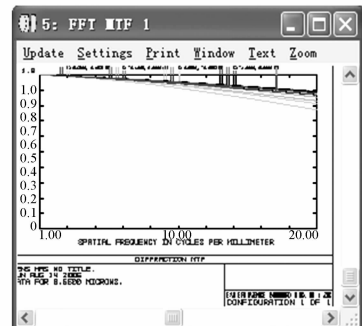


图 2 光学系统的 MTF 图

Fig. 2 MTF picture of optical system

性修正,成像面充分倾斜可以补偿剩余的残差。

### 3 衍射光强分布分析

本文采用 MEMS 工艺制作的狭缝阵列最小缝宽为  $6 \mu\text{m}$ ,入射光经过狭缝后发生衍射,由于在第一反射镜上形成的是衍射光斑,而不再是入射狭缝的像,因此必须考虑衍射光强的分布,才能精确量化不同类型阿达玛狭缝的光通量对比。狭缝尺寸、间隔和种类三者决定衍射后光斑的形状、位置和光强分布。为了对比分析,采用了阿达玛 S15 型微硅片狭缝阵列和阿达玛循环 S15 微硅片型狭缝阵列进行研究<sup>[3]</sup>。两个狭缝实物分别如图 3 和图 4 所示。

如图 5 所示,根据标量衍射理论,在任意点  $P$  处光场复振幅的夫琅和费衍射公式为:

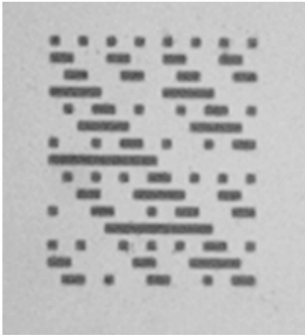


图 3 阿达玛 S15 型微硅片狭缝阵列

Fig. 3 Hadamard S15 micro-silicon-slit matrices

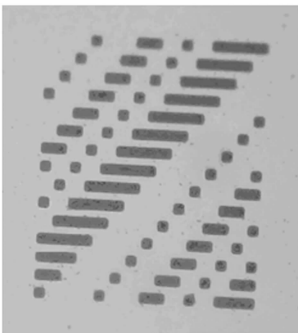


图 4 阿达玛循环 S15 型微硅片狭缝阵列

Fig. 4 Hadamard cyclic S15 micro-silicon-slit matrices

$$U_{(x,y)} = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} e^{ik\frac{x^2+y^2}{2z}} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{U}(x_1, y_1) e^{-2\pi i(\frac{x_1 x + y_1 y}{\lambda z})} dx_1 dy_1, \quad (1)$$

$U_{(x,y)}$ 是在接收屏 $(x,y)$ 处的复振幅, $\tilde{U}(x_1, y_1)$ 是光源刚刚经过衍射屏后的复振幅,其中

$$\tilde{U}(x_1, y_1) = \tilde{U}_0(x_1, y_1) \times t(x_1, y_1), \quad (2)$$

$t(x_1, y_1)$ 是衍射屏的复振幅透射系数, $\tilde{U}_0(x_1, y_1)$

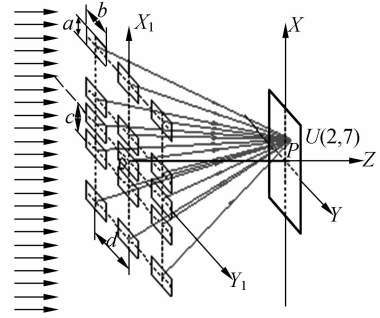


图 5 衍射理论分析示意图

Fig. 5 Schematic diagram of diffractive theory analysis

是光源透过衍射屏前的复振幅。假定以单位振幅的平面波直照明时  $\tilde{U}(x_1, y_1) = t(x_1, y_1)$ ,二元函数  $t(x_1, y_1)$ 在接收屏上满足普遍的傅里叶积分存在条件,由式(1)可见,除了与 $(x_1, y_1)$ 无关的振幅和相位因子外,夫琅和费衍射可以看作是函数  $t(x_1, y_1)$ 的傅里叶变换,公式(1)可写成:

$$U_{(x,y)} = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} e^{ik\frac{x^2+y^2}{2z}} F\{t(x_1, y_1)\}. \quad (3)$$

本文采用的是循环 S 型狭缝结构,按照狭缝的空间分布特点,衍射屏的透射函数可写成下式<sup>[4]</sup>:

$$t(x_1, y_1) = \text{rect}\left(\frac{x_1}{a}\right) \times \text{rect}\left(\frac{y_1}{b}\right) \otimes \sum \delta(x_1) \otimes \delta(y_1), \quad (4)$$

$$\text{其中: } \sum \delta(x_1) \otimes \delta(y_1) = \sum_{n=1, m=1}^{n=N, m=M} \delta(x_1 - nc) \otimes \delta(y_1 - md).$$

$a, b$ 分别是入射狭缝最小矩形单元沿  $x_1$  轴,  $y_1$  轴方向的长度, $c, d$ 分别是相邻矩形单元沿  $x_1$  轴,  $y_1$  轴方向的中心距; $nc, md$ 表明在  $x_1$  方向  $nc$  处,  $y_1$  方向  $md$  处存在着狭缝单元。式(4)经过傅里叶变化后可得到:

$$F\{t(x_1, y_1)\} = a \times \sin c\left(a \frac{x}{\lambda z}\right) \times b \times \sin c\left(b \frac{y}{\lambda z}\right) \times \left\{ \sum_{n=1, m=1}^{n=N, m=M} e^{i2\pi n c \frac{x}{\lambda z}} \times e^{i2\pi m d \frac{y}{\lambda z}} \right\}, \quad (5)$$

式(5)代入式(1)得到:

$$U_{(x,y)} = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} e^{ik\frac{x^2+y^2}{2z}} \times a \times \sin c(a\frac{x}{\lambda z}) \times b \times \sin c(b\frac{y}{\lambda z}) \times \left\{ \sum_{n=1, m=1}^{n=N, m=M} e^{i2\pi n\frac{x}{\lambda z}} \times e^{i2\pi m\frac{y}{\lambda z}} \right\}, \quad (6)$$

取式(6)模的平方得:

$$I_{(x,y)}^2 = \frac{1}{(\lambda z)^2} \times \left| a \times \frac{\sin \pi a \frac{x}{\lambda z}}{\pi a \frac{x}{\lambda z}} \times b \times \frac{\sin \pi b \frac{y}{\lambda z}}{\pi b \frac{y}{\lambda z}} \right|^2 \times \left| \sum_{n=1, m=1}^{n=N, m=M} e^{i2\pi n\frac{x}{\lambda z}} \times e^{i2\pi m\frac{y}{\lambda z}} \right|^2. \quad (7)$$

系统的第一抛物面反射镜作为接收屏,反射镜表面方程为:

$$z = \frac{x^2}{2p} + \frac{y^2}{2p}. \quad (8)$$

其中  $p=50.64 \text{ mm}$ , 将  $z$  代入公式(7), 最终得到的  $I_{(x,y)}^2$  即为在接收屏上任意一点处衍射光斑的光强分布。

本文采用 Matlab 软件对  $I_{(x,y)}^2$  进行仿真计算,阿达玛 S15 型狭缝阵列在接收屏上的衍射光强分布结果如图 6 所示。当入射狭缝为阿达玛循环 S15 型狭缝阵列时,在接收屏上的衍射光强分布结果如图 7 所示。

经仿真计算,  $\sum I_{(S15)}^2 / \sum I_{(Cyclic-S15)}^2 = 1.45$ , 即与阿达玛循环 S15 型狭缝阵列光谱仪相比,阿达玛 S15 型狭缝阵列光谱仪的光通量是前者的 1.45 倍。

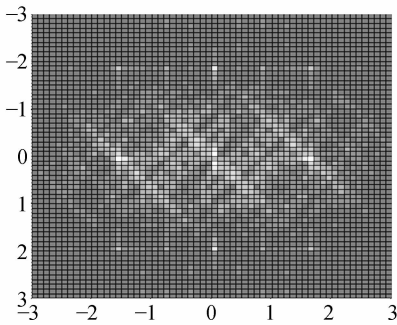


图 6 阿达玛 S15 型狭缝阵列衍射光强分布 Matlab 仿真图

Fig. 6 Matlab simulation of diffraction distribution of Hadamard S15 micro-silicon-slit matrices

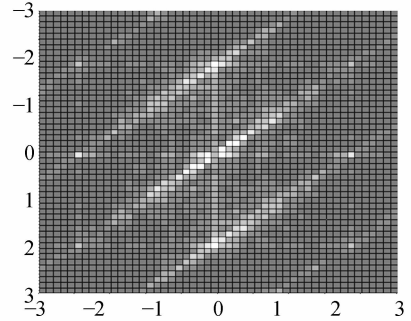


图 7 阿达玛循环 S15 型狭缝阵列衍射光强分布 Matlab 仿真图

Fig. 7 Matlab simulation of diffraction distribution of Hadamard cyclic-S15 micro-silicon-slit matrices

### 4 实验验证

为了检验公式及 Matlab 软件得出的衍射后光强分布的准确性,搭建了实验平台进行测量。测量装置系统由光源、扩束镜组、起偏/检偏器、光阑、微硅片狭缝、CCD 和计算机组成,如图 8 所示。入射光经过 CCD 光学系统后,焦平面上远离光轴的光要比靠近光轴的光衰减得多一些,各点不是“均匀曝光”,导致像素间产生光电响应不均匀。在实验中为了使各像素点的光电响应相同,去掉了 CCD 的镜头。CCD 感光器件大小为  $0.82 \text{ cm}(1/3 \text{ in})$ , 距离狭缝为  $30 \text{ mm}$ 。阿达玛 S15 型狭缝阵列产生的衍射图样如图 9 所示,阿达玛循环 S15 型狭缝阵列产生的衍射图样如图 10 所示。两种狭缝实际衍射图样与 Matlab 仿真的衍射光强分布一致。

使用光电池在相同条件下测得两种狭缝衍射后光强比值如表 1 所示,计算后平均值为  $\sum I_{(S15)}^2 / \sum I_{(Cyclic-S15)}^2 = 1.42$ 。

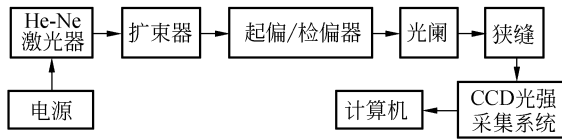


图 8 测量装置示意图

Fig. 8 Schematic diagram of measuring devices

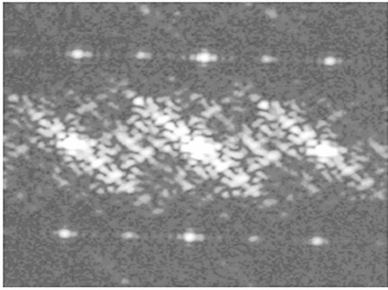


图 9 阿达玛 S15 型狭缝阵列实际衍射图

Fig. 9 Actual diffraction of Hadamard S15 micro-silicon-slit matrices

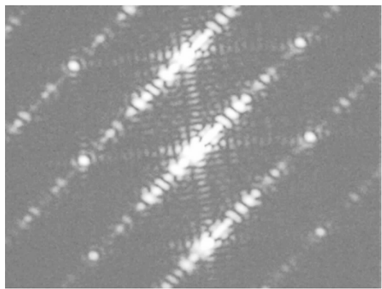


图 10 阿达玛循环 S15 型狭缝阵列实际衍射图

Fig. 10 Actual diffraction of Hadamard cyclic-S15 micro-silicon-slits matrices

偏差;

(3) 本文设计的光谱仪器,入射光接收面是抛球面,而 CCD 和光电池只能是平面接收。测量值与仿真值之间存在误差,但由于抛球面曲率半径很大,接近平面,所以产生的误差并不大。

## 5 光谱仪分辨率分析

本系统采用 Offner 光学结构,从光栅衍射方程推导出的光谱仪分辨率公式如下<sup>[5]</sup>:

$$d(\sin \alpha \pm \sin \beta) = m\lambda, \quad (8)$$

其中,  $\alpha$  为入射角,  $\beta$  为衍射角,  $d$  为光栅常量,  $m$  为衍射级次,  $\lambda$  为光波波长。“+”表示  $\alpha$  和  $\beta$  同侧,“-”表示两者异侧。当引入狭缝的宽度后,衍射方程变为:

$$[\sin(\alpha + \Delta\alpha) \pm \sin(\beta + \Delta\beta)] = m\lambda, \quad (9)$$

其中,  $\Delta\alpha$  表示入射微小扩散角,  $\Delta\beta$  表示衍射光束微小扩散角。经变换可推导出:

$$\Delta\lambda = \frac{dS \cos \alpha}{mf}, \quad (10)$$

其中,  $S$  为狭缝宽度,  $f$  为系统焦距。由式(10)可得出入射狭缝的宽度与分辨率成正比变化。

由以上分析可知,当光谱仪的入射狭缝采用 MEMS 工艺制成的阿达玛型微硅片狭缝阵列时,如果系统对分辨率有更高的要求,只要把每个狭缝单元的狭缝宽度变窄,同时增加狭缝的个数,就可以完全解决传统光谱仪分辨率和光通量之间的矛盾关系。利用 MEMS 工艺加工的微硅片狭缝阵列的最小单元的缝宽可以在  $1 \sim 100 \mu\text{m}$  内任意选择,完全满足系统分辨率对狭缝宽度的要求<sup>[6]</sup>。

## 6 结 论

本文利用 MEMS 技术加工出 S15 型和循环 S15 型阿达玛微硅片狭缝阵列,制作了光学系统体积只有  $5.2 \text{ cm} \times 3.0 \text{ cm} \times 1.9 \text{ cm}$  的阿达玛微小型光谱仪。介绍了光谱仪的结构及工作原理。研究入射狭缝的衍射现象,推导出光强分布公式,并利用 Matlab 软件对推导出的公式进行仿真。搭建了测试平台对阿达玛 S15 型狭缝阵列和阿达玛循环 S15 型狭缝阵列的光通量进行测量比较。实验结果表明,在相同的情况下, S15 型狭缝阵列

表 1 阿达玛 S15 型与阿达玛循环 S15 型狭缝阵列实际比值  
Tab. 1 Comparison between multi-slits of S15 and cyclic-S15

次数	1	2	3	4	5	6	7
比值	1.44	1.52	1.29	1.46	1.33	1.38	1.54

误差结果分析:

(1) 用 CCD 和光电池测量时,测量系统在搭建过程中存在安装误差,如距离、平行度、对准程度等偏差会累加在一起;

(2) 在微狭缝阵列加工过程中会产生  $0.1\%$  的加工误差,这也与 Matlab 仿真中理想赋值略有

的光通量是循环 S15 型狭缝阵列光通量的 1.45 倍,表明阿达玛 S15 型狭缝阵列更适合本文设计

的光谱仪,结论为多狭缝光谱仪入射狭缝的选择提供了完善的理论及实际依据。

### 参考文献:

- [1] RIESENBERG R, SEIFERT T. Design of spatial light modulator microdevices: microslit arrays[J]. *SPIE*, 1999, 3680: 406-414.
- [2] 周连群, 吴一辉, 张平, 等. 基于 MEMS 技术的微型分光光度计[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(6): 990-997.
- ZHOU L Q, WU Y H, ZHANG P, *et al.*. Micro-spectrophotometer based on MEMS technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 990-997. (in Chinese)
- [3] HARWIT M, SLOANE N J A. *Hadamard Transform Optics* [M]. New York: Academic Press, 1979.
- [4] 梁柱. *光学原理教程* [M]. 北京: 北京航空航天大学

- 学, 2005: 47-51.
- LIANG ZH. *Optics Theory Tutorial* [M]. Beijing: Beihaing University Press, 2005. (in Chinese)
- [5] 周连群, 吴一辉, 张平, 等. 一种采用微硅片狭缝的新型微小型光纤光谱仪[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(6): 637-642.
- ZHOU L Q, WU Y H, ZHANG P, *et al.*. A new mini-fiber-spectrometer adopting micro-silicon-slit [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 637-642. (in Chinese)
- [6] 鞠辉, 吴一辉. 微型光谱仪的发展现状[J]. *光学精密工程*, 2001, 9(4): 372-376.
- JU H, WU Y H. The State of the art of micro spectrometers[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(4): 372-376. (in Chinese)

### 作者简介:



范 玉(1979—),女,吉林长春人,博士研究生,2002 年于长春工业大学获得学士学位,2005 年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事微光机电系统的研究。E-mail: fanyu126@126.com



吴一辉(1965—),女,内蒙古呼和浩特人,博士,研究员,博士生导师,1986 年于天津轻工业学院获得学士学位,1991 年、1996 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事集成微光机电系统的研究。E-mail: yihuiwu@ciomp.ac.cn

### 导师简介:



宣 明(1956—),男,江苏常州人,硕士,研究员,博士生导师,1982 年于长春光机学院获得学士学位,1985 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事集成微光机电系统的研究。



张 平(1958—),女,北京人,学士,副研究员,1982 年于吉林大学获得学士学位,主要从事集成微光机电系统的研究。E-mail: zhangpingres@163.com



周连群(1981—),男,山东金乡人,博士研究生,2003 年于中国科技大学获得学士学位,主要从事集成微光机电系统的研究。E-mail: lianqunzhou@sohu.com



庄须叶(1981—),男,山东日照人,博士研究生,2004 年于中国石油大学获得学士学位,主要从事集成微光机电系统的研究。E-mail: zxye8888@hotmail.com