

# 基于二维周期结构衍射的套刻测量技术研究

彭博方<sup>1,2</sup> 陆海亮<sup>2</sup> 王帆<sup>2</sup> 许琦欣<sup>1,2</sup> 侯文玫<sup>1</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093

<sup>2</sup>上海微电子装备有限公司, 上海 201203

**摘要** 基于衍射光探测的套刻测量技术(DBO)具备高分辨率、高精度及低的工具引起偏差(TIS)等显著优点,已逐步取代传统基于成像的套刻测量技术(IFO),成为大规模集成电路22 nm及以下工艺技术节点所广泛采用的套刻测量方式。相较IFO技术,DBO技术面临的最大问题是标记成本高,测量时间长。IFO技术仅需使用单个标记测量 $x$ 、 $y$ 两个方向的套刻误差,而DBO则需要分别使用 $x$ 、 $y$ 两种方向的一维光栅实现测量,且每个方向至少需要2个标记。提出一种基于二维周期结构标记衍射光探测的套刻测量方法,使用严格耦合波分析(RCWA)算法建立标记衍射光的物理模型,通过分析该方法测量套刻的灵敏度、主要测量误差,验证该方法的可行性。二维DBO测量方法的应用,将使标记成本和测量时间比传统的DBO方法减少一半,显著降低DBO测量的成本并提高测量效率。

**关键词** 测量;套刻;衍射;光栅;严格耦合波分析

中图分类号 TN305.7 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.021201

## Research on Diffraction-Based Overlay Measurement Using Two-Dimensional Periodic Structure

Peng Bofang<sup>1,2</sup> Lu Hailiang<sup>2</sup> Wang Fan<sup>2</sup> Xu Qixin<sup>1,2</sup> Hou Wenmei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China*

<sup>2</sup>*Shanghai Micro Electronics Equipment Co., Ltd., Shanghai 201203, China*

**Abstract** Diffraction based overlay (DBO) metrology has fully demonstrated its remarkable advantages in terms of high resolution, high precision and low tool-induced shift (TIS) and so on. DBO technologies have been gradually replaced the traditional image based overlay (IFO) technologies and have also been developed to address the overlay metrology challenges for 22 nm technology node and beyond. In comparison with IFO technologies, the biggest problems that DBO faces now are high mark costs and long measurement time. IFO only uses single pad for two-dimensional (2D) overlay errors measurement, while DBO should adopt one-dimensional gratings for measurement with  $x$ ,  $y$  directions. Furthermore, at least two marks are needed for one direction measurement. We introduce 2D periodic structure based DBO technologies. The DBO physical model is established through rigorous coupling wave analysis (RCWA) program. The feasibility of this method is proved by means of analysis of the overlay measurement sensitivity and main measurement errors. The application of 2D DBO measurement technology can help to reduce the measurement time and mark cost by half. The DBO measurement cost will thus be dramatically lowered, and the measurement efficiency will be promoted.

**Key words** measurement; overlay; diffraction; gratings; rigorous coupled-wave analysis

**OCIS Codes** 120.1880; 050.1950; 050.1755; 260.1960

## 1 引言

根据 International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS)给出的套刻测量路线图,在22 nm和以下工艺节点的套刻误差的控制精度为4.5 nm,对套刻测量的精度要求为0.45 nm。传统的基于成像的

收稿日期: 2013-9-17; 收到修改稿日期: 2013-10-22; 网络出版日期: 2014-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(51075280)

作者简介: 彭博方(1988—),男,硕士研究生,主要从事光学测量方面的研究。E-mail: pbfcq@sina.com

导师简介: 侯文玫(1950—),女,博士,教授,主要从事光学测量方面的研究。E-mail: houwenmei@vip.citiz.net

套刻测量技术(BO)由于已达到其光学分辨率的极限,故难以适应新技术节点的要求。新的基于衍射光探测的套刻测量技术(DBO)正逐步成为新的套刻测量替代方案。该技术通过测量套刻标记的衍射光光强来确定套刻误差,不受光学分辨率的限制,且能够有效地避免BO方法带来的许多测量误差,如定位误差、焦面误差、像差因素、照明均匀性和机械振动等,使工具引起偏差(TIS)最小,具有极高的测量精度<sup>[1-3]</sup>。

基于经验公式的eDBO测量方式,是指采用经验公式对散射光特征随套刻改变的曲线作低阶拟合处理的方法。目前DBO所使用的标记为一维光栅,当套刻发生变化时,其各级光衍射效率会随之变化。具体地讲,当套刻为0时, $\pm 1$ 级衍射效率相等。套刻不为0时, $\pm 1$ 级光的衍射效率不同,通常称两者衍射效率差为非对称性,且在一定范围内,套刻与非对称性满足线性关系<sup>[4]</sup>,根据此线性关系,求解套刻值。eDBO求解参数只针对套刻,对计算资源要求极低,其求解难度低,准确性高。

传统eDBO标记为一维(1D)光栅,由于其仅在与光栅沟槽垂直方向上能产生衍射信号,故至少需要两组沟槽方向垂直的光栅以实现 $x$ 、 $y$ 方向套刻的测量。在半导体制造中,标记的增加会减少有效曝光区域的面积,从而增加成本;同时对于套刻测量,标记的增加意味着测量次数的增加,这就会增加测量时间,影响套刻测量的速度<sup>[5]</sup>。而使用二维(2D)周期性结构作为套刻测量标记,可以在 $x$ 、 $y$ 方向上同时产生可用于套刻测量的衍射信号,这就减少了标记数量,进而可提高测量速度<sup>[6]</sup>。本文先使用严格耦合波分析(RCWA)方法仿真建立了二维周期性结构模型,并验证其正确性,然后分析了套刻误差,最后仿真计算了模型套刻测量灵敏度。

## 2 eDBO线性关系及其公式

图1所示为典型的一维光栅DBO标记<sup>[7]</sup>,其中下层光栅通过首次曝光得到,一般为基底材料硅;中间层为 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 薄膜,上层光栅为第二次曝光得到,一般为光刻胶。当第二次曝光不能完全与首次曝光完全重合时,上下层光栅间将产生相对位移,这个位移量为套刻。图1中, $I_0$ 表示零级光, $I_{+1}$ 、 $I_{-1}$ 分别表示 $\pm 1$ 级光,当套刻发生变化时, $\pm 1$ 级光的衍射效率也随套刻发生变化,且1级光衍射效率的差值是与套刻相关的函数。

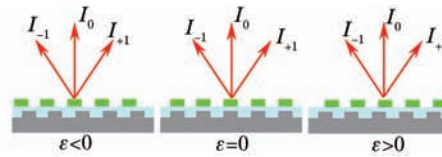


图1 1级光强非对称性随套刻误差 $\varepsilon$ 的变化

Fig.1 First order intensity asymmetry varying as a function of overlay error  $\varepsilon$

这里假设 $\pm 1$ 级反射光光强为 $I_+$ 和 $I_-$ ,则它们的衍射效率差值即不对称性定义为 $A = I_+ - I_-$ 。在一定范围内,套刻与衍射效率非对称性满足线性关系,即 $A$ 与上下两层标记的位置偏移 $x$ 近似成正比,其关系为

$$A(x) = kx, \quad (1)$$

式中 $k$ 为仅与标记制作工艺相关的常量。通常一组标记由两块预设偏差为 $\pm d$ 的标记组成,第二次曝光时所产生的随机偏差,即所要测量的套刻误差为 $\varepsilon$ 。实际上下两层标记间位置偏移量分别为 $d + \varepsilon$ 、 $-d + \varepsilon$ ,由(1)式可知

$$\begin{aligned} A(d + \varepsilon) &= k \cdot (d + \varepsilon) \\ A(-d + \varepsilon) &= k \cdot (-d + \varepsilon) \end{aligned} \quad (2)$$

则有

$$\varepsilon = d \cdot \frac{A(d + \varepsilon) + A(-d + \varepsilon)}{A(d + \varepsilon) - A(-d + \varepsilon)}. \quad (3)$$

同样可以得到

$$k = A(\varepsilon \pm d) / (\varepsilon \pm d). \quad (4)$$

可根据这一线性关系在eDBO线性区间内求得套刻值。

目前eDBO面临的主要问题在于标记成本较高,如上文所述,其主要原因之一在于,至少需要使用两组共四块标记以完成套刻测量。本文提出使用一种二维周期性结构:二维矩形光栅作为套刻标记,进行eDBO测量的技术。该技术能够使用一组标记同时得到两个方向的套刻信息,实现 $x$ 、 $y$ 方向套刻的同时测量,从而降低套刻成本,减小测量时间。

### 3 套刻测量原理

#### 3.1 二维套刻误差的严格耦合波建模理论

二维套刻误差的严格耦合波建模理论与一维矩形面型的严格耦合波建模理论原理和步骤一致<sup>[8-10]</sup>。二维单层周期结构的严格耦合波建模亦可分为:表达各区域电磁场,建立耦合波方程<sup>[11]</sup>,利用边界条件数值求解,可获得反射、透射系数,进而求取反射/透射率、椭圆参数、电磁场分布等<sup>[12-14]</sup>。其区别在于,二维套刻误差引入了 $x$ 、 $y$ 两个方向的套刻误差 $O_x$ 、 $O_y$ ,如图2所示,图中为两层二维阵列和均匀介质层相隔的结构,从上层至下各层厚度分别为 $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 。在二维套刻误差建模中,须考虑建模误差 $O_x$ 、 $O_y$ 带来的介电常数展开级数相位延迟因子。当不存在套刻误差时,介电常数

$$\varepsilon(x,y) = \sum_{g,h} \varepsilon_{gh} \exp\left(j\frac{2\pi gx}{\Lambda_x} + j\frac{2\pi hy}{\Lambda_y}\right), \quad (5)$$

其中,展开项系数有如下关系:

$$\varepsilon_{gh} = \frac{1}{\Lambda_x} \frac{1}{\Lambda_y} \int_{-\Lambda_x/2}^{\Lambda_x/2} \int_{-\Lambda_y/2}^{\Lambda_y/2} \varepsilon(x,y) \exp\left[-j\left(\frac{2\pi gx}{\Lambda_x} + \frac{2\pi hy}{\Lambda_y}\right)\right] dx dy, \quad (6)$$

以上两式中, $\Lambda_x$ 、 $\Lambda_y$ 分别为矩形光栅在 $x$ 、 $y$ 方向上的周期, $g$ 、 $h$ 分别表示各个方向上的Fourier展开级次。由Fourier级数展开公式,两方向的套刻误差分别为 $O_x$ 、 $O_y$ 时,由Fourier变换的“时移”特性,可得 $\varepsilon'_{g,h}$ 与零套刻误差下的展开项系数 $\varepsilon_{g,h}$ 有如下关系:

$$\varepsilon'_{g,h} = \exp\left[-j\left(g\frac{2\pi}{\Lambda_x}O_x + h\frac{2\pi}{\Lambda_y}O_y\right)\right] \varepsilon_{g,h}. \quad (7)$$

因此,对于套刻误差建模时的介电常数,可通过零套刻误差下的展开项系数乘以一个相移因子求得。

#### 3.2 二维周期性结构模型建立

使用严格耦合波算法仿真二维周期性结构套刻测量标记模型,膜系结构为:最上层为膜厚度为120 nm的光刻胶,构成二维矩形周期性结构,其 $x$ 、 $y$ 方向周期都为1000 nm,占空比分别为1:1;第二层为 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 薄膜,膜厚为10 nm;第三层是由镶嵌在基底材料Si中膜厚度为150 nm的Cu构成的二维矩形周期性结构,其周期及占空比与光刻胶相同。仿真模拟采用633 nm波段,正入射至套刻测量标记,如图2所示。

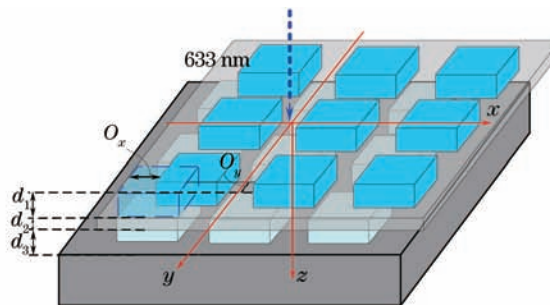


图2 二维周期性结构套刻误差

Fig.2 Overlay errors of 2D periodic structure

#### 3.3 二维周期性结构建模算法正确性验证

建立光栅周期为 $x$ 方向其余参数与二维周期性结构完全相同的一维光栅模型,对于二维周期性结构,当上下两层膜系结构的 $y$ 方向占空比都为1时,所建模型应与上述一维标记完全相同。通过计算两种模型在不同套刻值下的衍射效率,对比二者以验证建模算法的正确性。

图3(a)表示一维周期性结构在 $x$ 方向套刻-0.5周期至0.5周期变化时,0级光的衍射效率。图3(b)则表示二维周期性结构与传统一维光栅标记在相同套刻值下的0级衍射效率差,两者相差在 $10^{-12}$ 量级。故可以断定二维周期性结构用于套刻计算的算法及所建模型都是正确的。

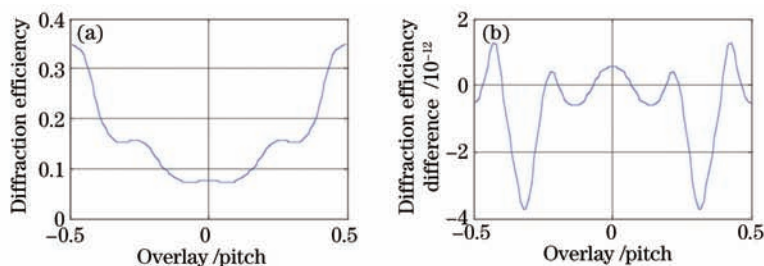


图3 (a) 一维光栅0级光衍射效率; (b) 一维光栅与二维结构0级光衍射效率差

Fig.3 (a) Zeroth diffraction efficiency of the 1D grating; (b) zeroth diffraction efficiency difference between the 1D grating and 2D structure

## 4 套刻测量误差分析

### 4.1 算法误差

在套刻测量线性范围内仿真套刻测量算法误差。通过仿真计算可得到各个套刻下的衍射效率及其非对称性,结合(3)式。得到套刻测量值,通过计算套刻测量值与套刻预设偏差得到套刻算法误差量。图4所示分别为一维光栅和二维周期性结构算法误差。对于二维周期性结构, $y$ 方向预设套刻偏差为0。图中横坐标表示套刻与光栅周期比值,纵坐标为算法误差,单位为nm。可知,两种测量方式的套刻测量算法误差均在 $10^{-2}$  nm量级,在套刻测量可接受的范围以内。

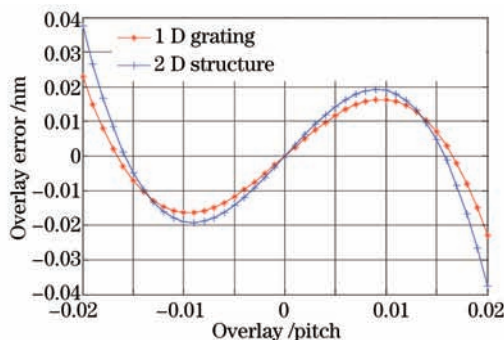


图4 一维光栅与二维周期性结构套刻测量误差

Fig.4 Overlay measurement errors of 1D grating and 2D periodic structure

### 4.2 串扰误差

前文所述的二维周期性结构衍射效率均在 $y$ 方向套刻为0时仿真计算得到,如果来实现两个方向同时测量套刻,需考虑标记一个方向的套刻误差对测量另一个方向套刻的影响。仿真计算了 $y$ 方向套刻变化所引起的 $x$ 方向套刻测量误差,如图5所示。图中各条线表示当 $y$ 方向套刻分别为0.005~0.02周期时相对 $y$ 方向套刻为0时的套刻测量误差。由图5可知,因 $y$ 方向套刻变化所带来的误差为 $10^{-4}$  nm量级,在套刻测量可接受范围内。进而可以得出结论:使用二维周期性作为套刻测量标记进行 $x$ 、 $y$ 方向套刻测量,套刻测量算法误差在 $10^{-2}$  nm量级以下,在精度上能够满足套刻测量需求。

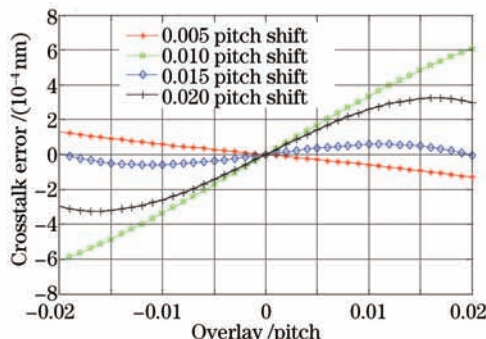


图5 非套刻测量方向位移引入套刻误差量

Fig.5 Overlay measurement errors introduced by the displacement in the one-measurement other direction

## 5 套刻测量灵敏度分析

由于eDBO测量套刻的实质是分析因套刻而引起的衍射光强非对称性,从而得到套刻信息,所以当套刻的变化引起的衍射光非对称性越大时,在套刻测量越有利。换句话说,对于套刻测量的线性范围内,如公式 $A(x)=kx$ 所示,可以认为 $k$ 代表套刻测量灵敏度, $k$ 值越大,套刻测量的灵敏度就越高。

对于二维周期性结构,假设在 $y$ 方向套刻为0的情况下,计算一个周期内的 $x$ 方向套刻变化所引起的衍射效率非对称性。图6所示为 $\pm 1$ 级衍射光非对称性随套刻变化的曲线图。在 $-0.05\sim 0.05$ 周期范围内基本满足线性关系,根据实际前道套刻测量的需要,选择 $-0.02\sim 0.02$ 周期,即 $-20\sim 20$  nm为线性区间进行套刻测量仿真实验。

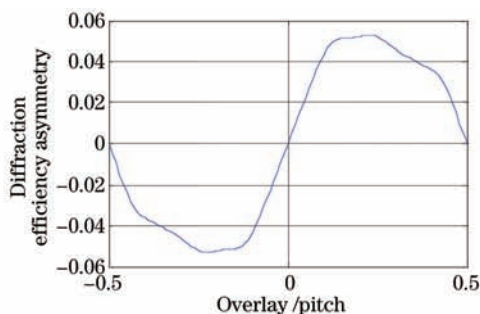


图6 衍射效率非对称性与套刻之间的关系

Fig.6 Relationship between diffraction efficiency asymmetry and overlay

在套刻测量线性区间 $-20\sim 20$  nm范围内,每隔1 nm计算衍射效率非对称性,并以套刻为横坐标,相应的衍射效率非对称性为纵坐标,拟合出非对称性关于套刻的直线,由(1)式可知,该直线的斜率即为灵敏度系数 $k$ 。

分别计算二维周期性结构及一维光栅的灵敏度系数,结果如图7所示。得到二维周期性结构灵敏度系数 $k=1.53$ ,拟合残差 $2.466\times 10^{-5}$ ,根据已建立的一维光栅标记模型计算灵敏度系数 $k=0.637$ ,拟合残差 $2.796\times 10^{-5}$ ,两种拟合残差均很小,满足要求。图7横坐标表示线性区域内的套刻与光栅周期的比值,纵坐标表示对应套刻下的衍射效率非对称性。图7结果表明基于所建二维周期性结构模型的套刻测量灵敏度低于传统一维光栅,但仍具备一定的套刻测量灵敏度,对于套刻测量设备而言,可以通过改进相关传感器灵敏度等措施来满足套刻测量对灵敏度的要求。

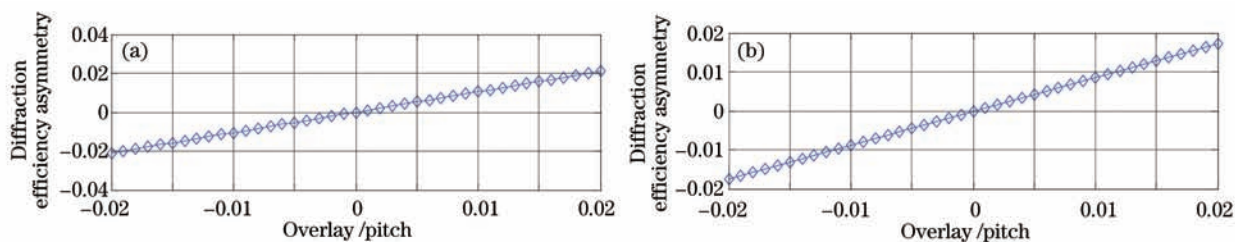


图7 (a)一维光栅与(b)二维周期结构灵敏度对比

Fig.7 Comparison of sensitivity between (a) 1D grating and (b) 2D peridic structure

## 6 结 论

提出了一种同时测量两个方向套刻的套刻测量技术,并验证了其算法及所建模型的正确性。计算了二维周期结构的灵敏度和算法误差并与传统一维光栅标记相对比,算法误差两者处于同一量级,二维周期结构灵敏度略小于一维光栅,但仍处于同一量级。结果表明,基于二维周期结构的衍射测量套刻技术能够实现两个方向套刻的同时测量,从而节省大量的测量时间和标记成本。

### 参 考 文 献

- 1 Jie Li, Oleg Kritsun, Yongdong Liu, *et al.*. Faster diffraction-based overlay measurements with smaller targets using 3D gratings[C]. SPIE, 2012, 8324: 83241I.
- 2 Boo-Hyun Ham, Hyun-Jea Kang, Chan Hwang, *et al.*. A novel, robust, diffraction-based metrology concept for

- measurement& monitoring of critical layers in memory devices[C]. SPIE, 2010, 7638: 76381S.
- 3 Dasri P, Korlahalli R, Li J, *et al.*. Diffraction based overlay metrology for double patterning technologies[C]. SPIE, 2009, 7272: 727212.
- 4 Chih-Ming Ke, Guo-Tsai Huang, Jacky Huang, *et al.*. Accuracy of diffraction-based and image-based overlay[C]. SPIE, 2011, 7971: 79711E.
- 5 Shi Weijie, Wang Xiangzhao, Ma Mingying, *et al.*. An in-situ method for measuring the overlay performance of a lithographic system with mirror-symmetry marks[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(3): 398-402.  
施伟杰, 王向朝, 张冬青, 等. 基于镜像焦面检测对准标记的套刻性能原位测量技术[J]. 光学学报, 2006, 26(3): 398-402.
- 6 Prasad Dasari, Nigel Smith, Gary Goelzer, *et al.*. A comparison of advanced overlay technologies[C]. SPIE, 2010, 7638: 76381P.
- 7 Jie Li, Asher Tan, Jin Woo Jung, *et al.*. Evaluating diffraction-based overlay[C]. SPIE, 2012, 8324: 83243A.
- 8 M G Moharam, Drew A Pommet, Eric B Grann. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach[J]. Opt Soc Am A, 1995, 12(5): 1077-1086.
- 9 M G Moharam, Eric B Grann, Drew A Pommet. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings[J]. J Opt Soc Am A, 1995, 12(5): 1068-1076.
- 10 Fan Shuwei, Bai Liang, Zhou Qinghua. Research on blaze properties of diffraction gratings with vector simulation [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(s1): s105001.  
樊叔维, 白亮, 周庆华. 衍射光栅闪耀特性的矢量理论仿真研究[J]. 光学学报, 2012, 32(s1): s105001.
- 11 Yang Xuefeng, Shi Tielin, Zuo Haibo, *et al.*. Research on optical properties of hierarchical structure in butterfly wing scales based on rigorous coupled-wave analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0733002.  
杨雪峰, 史铁林, 左海波, 等. 基于严格耦合波理论的蝴蝶鳞翅分级结构光学特性研究[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0733002.
- 12 Ma Weitao, Zhou Jun, Huang Shuiping, *et al.*. Characteristic of subwavelength dielectric grating with metal layer and its sensing applications[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 0905008.  
马伟涛, 周骏, 黄水平, 等. 金属膜衬底上亚波长介质光栅结构的特性及传感应用[J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0905008.
- 13 Xie Changqing, Zhu Xiaoli, Niu Jiebing, *et al.*. Micro- and nano- metal structures fabrication technology and applications[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900128.  
谢常青, 朱效立, 牛洁斌, 等. 微纳金属光学结构制备技术及应用[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900128.
- 14 Yang Liangliang, Cui Qingfeng, Liu Tao, *et al.*. Measurement of diffraction efficiency for diffractive optical elements [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0412007.  
杨亮亮, 崔庆丰, 刘涛, 等. 衍射光学元件衍射效率的测量[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0412007.