

## 倒梯形双层金属光栅式偏振分束器

邓学松,方明,吴博,黄志祥

(安徽大学 电子信息工程学院 计算智能与信号处理教育部重点实验室,安徽 合肥 230039)

**摘要:** 为获得高衍射效率、高消光比、宽带宽及大角度容差的光栅结构,提出了一种在近红外波长区域工作的倒梯形双层金属光栅结构的偏振分束器。该结构引入了一层高折射率介质层,并且将光栅区的光刻胶斜切成倒梯形结构,新的设计增大了光栅的透射效率和消光比。使用严格耦合波分析方法,模拟和优化了偏振分束器的结构参数。结果表明,横磁波及横电波在 1 290~1 840 nm 波长范围内的透射效率和反射效率分别超过 97%和 95%。透射和反射的最大消光比分别为 33 dB 和 53 dB。在波长为 1 550 nm,入射角为 $-40^{\circ}$ ~ $40^{\circ}$ 时,光栅的透射和反射消光比都大于 22 dB,达到了高性能偏振分束器的要求。相较于双层金属矩形光栅,所提出的倒梯形双层金属结构表现出更高的透射性与反射性,同时具有更好的设计灵活性。

**关键词:** 双层亚波长光栅; 偏振分束器; 严格耦合波分析; 衍射光学; 近红外波段

**中图分类号:** O436.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0320002

## Polarization beam splitter with inverted trapezoidal double-layer metal grating

Deng Xuesong, Fang Ming, Wu Bo, Huang Zhixiang

(Key Laboratory of Intelligent Computing and Signal Processing of Ministry of Education, School of Electronics and Information Engineering, Anhui University, Hefei 230039, China)

**Abstract:** In order to obtain high diffraction efficiency, high extinction ratio, wide spectrum, and large angle tolerance grating structure, a polarizing beam splitter with inverted trapezoidal double layer metal grating structure working in the near-infrared wavelength region was proposed. The PBS structure included a high refractive index dielectric layer and cut the photoresist of the grating region into an inverted trapezoidal structure, which increased the transmission efficiency and extinction ratio of the grating. Rigorous coupled-wave analysis method was used to simulate and optimize the polarization beam splitter parameters. The results show that more than 97% transmission efficiency of the transverse

收稿日期:2018-10-05; 修订日期:2018-11-03

基金项目:国家自然科学基金(61601166,61701001,61701003);国家自然科学基金优秀青年科学基金(61722101);

安徽省高等学校自然科学研究项目(KJ2017ZD51, KJ2017ZD02)

作者简介:邓学松(1993-),男,硕士生,主要从事严格耦合波分析算法及其应用方面的研究。Email:dxs527@foxmail.com

通讯作者:方明(1990-),男,博士生,主要从事电磁多物理计算及新型材料电磁特性方面的研究。Email:mingfang@ahu.edu.cn

导师简介:黄志祥(1979-),男,教授,博士,主要从事电磁高性能计算及新型电磁材料、新型天线设计方面的研究。

Email:zxhuang@ahu.edu.cn

magnetic wave and over 95% reflection efficiency of the transverse electric wave can be achieved in the wavelength range from 1 290 to 1 840 nm. The corresponding maximum extinction ratios for the transmittance and reflectance are 33 dB and 53 dB, respectively. The proposed grating has an extinction ratios over 22 dB in the 1 550 nm wavelength and a large angle from  $-40^\circ$  to  $40^\circ$ , which meets the requirements for the high-performance polarizing beam splitters. Compared with the commonly used double layer metal rectangular gratings, the proposed inverted trapezoidal double layer structure exhibits higher transmittance and reflectance, which has greater design flexibility.

**Key words:** double-layered subwavelength grating; polarization beam splitter; rigorous couple wave analysis; diffractive optics; near-infrared wave band

## 0 引言

偏振分束器(Polarizing Beam Splitter, PBS)是能够将非偏振光分离成两束正交线偏振光束的基本光学元件。传统的 PBS 很大程度上依赖于晶体材料的自然双折射或者使用多层结构完成偏振选择<sup>[1-2]</sup>,造成其体积较大,制作繁琐,使得这些特性非常难以控制。为了减小偏振分束器的体积,降低它的制作难度,选用光栅结构对其进行设计。光栅结构的双折射效应具有偏振选择特性,所以出现了各种基于光栅结构的偏振器件,例如偏振器<sup>[3-4]</sup>,偏振滤色器<sup>[5]</sup>和偏振分束器<sup>[6-9]</sup>。文中所提出的新型 PBS 正是基于亚波长光栅结构<sup>[10]</sup>来设计的,具有许多优点,例如体积小,衍射效率高,高消光比,入射波范围更宽,抗干扰性强,制作工艺简单,生产成本低,适合大规模生产。此外 PBS 是光纤行业的重要元件,特别是在路由器,交换机,隔离器,液晶显示器件<sup>[11]</sup>上应用极其广泛。

传统的双层金属光栅已被提出用于传输或反射模式<sup>[12-16]</sup>。Wang Q 等<sup>[7]</sup>引入了一层高折射率的介质层,可以有效管控 PBS 的透射率,不过其仿真结果存在较大误差。He S 等<sup>[14]</sup>提出了一种双层堆栈结构分束器,该结构具有很大的入射角容差,但是其工作带宽较窄且消光比相对较低。Ji S 等<sup>[16]</sup>提出的夹层式偏振分束器,其结构简单,便于制作,但是其消光比随波长变化剧烈,角度容差较小。

为获得结构简单、性能稳定、易于加工的高衍射效率、高消光比、大角度容差的偏振光栅分束器,首次提出了一种倒梯形亚波长光栅结构,该结构在近红外光范围内的分束消光效果十分理想,光刻胶刻

蚀成倒梯形有效地增强了近场耦合,相比于双层金属矩形光栅结构<sup>[7]</sup>,该结构在可见光范围内的透射效果尤为明显。采用双层金属光栅结构,光刻胶的顶部与底部都覆上铝层,两个光栅层之间的干涉共振和近场耦合显著增强,提高了该结构的衍射效率。在基板和光栅之间引入高折射率介质层,介质层的厚度对偏振分束器的透射率和消光比影响较大,适当厚度的高折射率介质层可以改善 PBS 的光学性能。偏振分束器的衍射效果对光栅的参数变化较为敏感,使用严格耦合波分析算法(Rigorous Coupled Wave Analysis, RCWA)来优化其在 500~2 000 nm 波长范围内的光栅参数<sup>[17]</sup>。

## 1 倒梯形双层金属光栅的设计

### 1.1 原理分析

亚波长光栅的周期远小于入射波的波长,进而保证了零级以外的高级次衍射波均为不携带能量的倏逝波,所以对于零级衍射波具有较高的衍射效率,文中所设计的结构在其他非零级次的衍射效率几乎为零。采用严格耦合波分析(RCWA)方法设计该偏振光栅。严格耦合波方法是一种电磁矢量衍射理论,结合麦克斯韦方程和边界条件求出横磁波(Transverse Magnetic, TM)和横电波(Transverse Electric, TE)偏振分量的透射和反射效率。双层光栅中偏振选择透射的机理,涉及到两个金属狭缝层中的表面等离子体波导模式之间的耦合以及法布里-珀罗干涉,图 1 显示了基于倒梯形双层金属光栅的新型 PBS 示意图。为了增加近场耦合效率,使更多的人射光耦合到金属层之间的间隔中,将光刻胶蚀刻成倒梯形结构,在

光刻胶顶部覆盖一层铝，两个光栅之间的凹槽内也印刻上一层铝，则两个金属层之间的干涉共振和近场耦合效应会明显提高，由叶的研究<sup>[13]</sup>可得，当 TE 偏振光入射时，几乎所有的光都被反射回来，没有进入光刻胶中，所以反射率大于 95%，透射率几乎为零。当 TM 偏振光入射时，入射光被光刻胶的底切结构反射并耦合成表面等离子体波导模式，其中更多的能量被限制在光刻胶-铝界面周围并进行近场散射，很少的能量反射出光栅层，造成透射率大于 97%，反射率很低。由以上的分析可得反射和透射的消光比都相对较高，所以将光栅设计成倒梯形结构相当于增加耦合谐振空间，便于能量传输，进而增加 TM 偏振光的透射率。

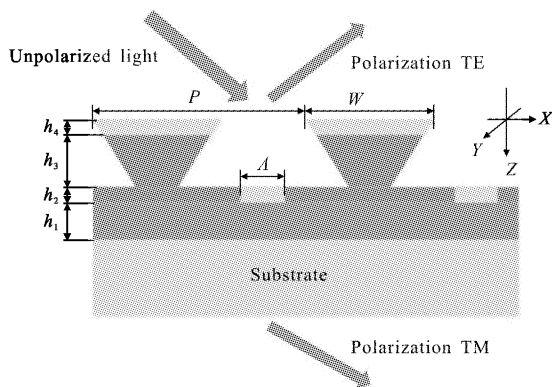


图 1 倒梯形光栅示意图

Fig.1 Schematic diagram of inverted trapezoidal grating

当偏振方向平行于栅条的 TE 偏振光入射到金属表面时，将引起电子沿栅条方向的自由振荡，栅条等效于一层金属层，TE 偏振光被金属栅条反射；对于偏振方向垂直于栅条的 TM 偏振光，由于栅条线宽远小于入射光波长，该方向上的电子振荡受到限制，栅条等效于一介质层，TM 偏振光将直接透过。所以偏振分束器会显示出很明显的分束效果。

### 1.2 光栅结构模型

通过对比发现，相比金、银、铜三种金属材料构成的光栅结构其 TM 波的透射效率稍显逊色但十分接近三者水平，而消光比明显高于其他金属，故选择铝作为光栅的金属材料，色散曲线依照 Drude 模型，考虑到提高衍射效率，并没有将凹槽内区域完全印刻满。高折射率电介质层被沉积在透明基板上，该层的折射率为 2.05，其高度是  $h_1$ ，蚀刻在光刻胶上的矩

形光栅的厚度为  $h_2$ ，宽度为  $\Lambda$ ，光刻胶的折射率取 1.6，此处参照了聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethyl Methacrylate, PMMA)的相关参数。倒梯形光刻胶上的铝层和印刻在矩形光刻胶内的铝层的厚度相同，倒梯形光刻胶上涂覆一层铝，最上层的宽度为  $W$ ，光栅的周期  $P=300\text{ nm}$ ，相应的占空比定义为  $f=W/P$ ，倒梯形光刻胶光栅的厚度为  $h_3$ ，顶层铝膜的厚度为  $h_4$ ，结构示意图如图 1 所示。

制作该结构的光栅图案，可以使用几种制造技术，包括全息曝光、电子束光刻、纳米压印光刻等，其中纳米压印光刻因为其成本低，生产效率高而成为首选。使用 RCWA 方法模拟一系列参数的变化，优化的参数主要是占空比，光刻胶厚度和金属层厚度。采用遗传算法对各参数进行优化，经过多次优化后可得到如下最优参数，当入射波长为  $1550\text{ nm}$ ，占空比  $f=0.6$ ， $h_2=h_4=35\text{ nm}$ ， $h_3=170\text{ nm}$  时，其 TM 偏振光的透射效率与 TE 偏振光的反射效率是最理想的。具体参数见表 1。

表 1 倒梯形光栅的最优参数

Tab.1 Optimized parameters of inverted trapezoidal grating

$h_1/\text{nm}$	$h_2/\text{nm}$	$h_3/\text{nm}$	$h_4/\text{nm}$	$\Lambda/\text{nm}$	$P/\text{nm}$	$f$	$\lambda/\text{nm}$
100	35	170	35	60	300	0.6	1550

### 1.3 引入高折射率介质层

在光栅区和基底区之间引入一层高折射率介质层，其厚度会影响 PBS 的厚度以及衍射效率，当波长为  $1550\text{ nm}$  的单色平面波以  $30^\circ$  的入射角从空气入射时，该层的厚度与衍射效率的关系曲线如图 2 所示，其中高折射率介质层的折射率为 2.05，所得的都是零阶级次的衍射效率。

随着介质层厚度的增加，调制效应显示出周期性变化。TM 偏振波的衍射效率在 0.972~0.981 之间来回振荡，TE 偏振波的衍射效率变化不明显，因为大部分 TE 偏振波是直接从铝膜反射出去。所以 TE 偏振波的反射效率变化幅度不是很大，但也是呈现周期变化。两个偏振光的衍射效率变化周期不同，这是由于 TM 偏振光和 TE 偏振光的等效折射率不同造成的。当  $h_1=100\text{ nm}$  时，TM 偏振透射率为 98%，与未加高折射率介质层相比，透射率显著提高了。因此

高折射率介质层选择适当的厚度可以改善 PBS 的  
光学性能,下文将对优化后的结构进行仿真分析。

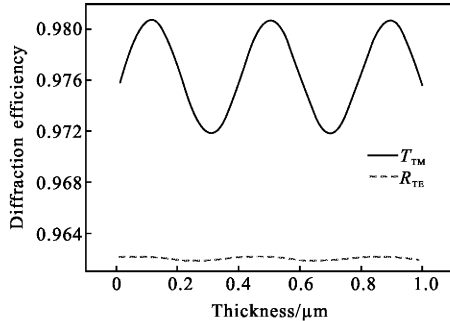


图 2 衍射效率随高折射率介电层的厚度变化的曲线

Fig.2 Diffraction efficiency as a function of the thickness of the high refractive index dielectric layer

## 2 优化过程和分析

双层金属光栅结构的 PBS 可以表现出出色的光学性能,该类结构必须考虑的特性就是衍射效率,消光比,入射波长,角度容差,这些特性可以用 RCWA 方法来模拟,该方法是一种严格矢量波分析方法,在计算色散的金属材料时具有很好的收敛性。

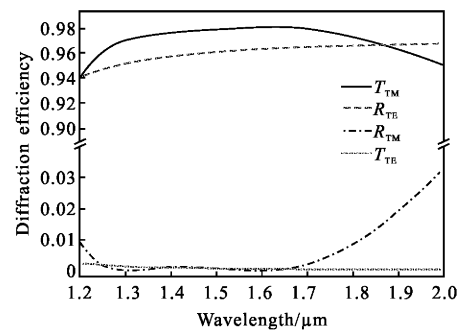
### 2.1 入射光波长对衍射效率的影响

文中所设计的倒梯形双层光栅结构相较于双层矩形金属光栅结构表现出更好的光学性能,倒梯形光栅结构在可见光波段表现出的光学性能更为优越,在 800~1 300 nm 波段倒梯形光栅结构的透射率也明显高于双层矩形金属光栅结构。在图 3 中将 TM 和 TE 偏振光的衍射效率绘制成波长的函数。根据图 2 所示,当高折射率介质层  $h_1$  为 100 nm 时,其衍射效率都相对较大。从图中可以看出入射波长为 1 320~2 000 nm 时, TM 偏振的透射率和 TE 偏振的反射率均大于 95%,最大值超过了 98%。TM 偏振的反射率和 TE 偏振的透射率均小于 0.5%,消光比在 1 250~1 690 nm 范围内超过了 27 dB,最高达到了 53 dB。表明新型的 PBS 可以分离 TE 和 TM 偏振光,可以在透射和反射模式下工作。双层金属偏振光栅的消光比是评价其偏振性能的最重要的性能参量,消光比越大,偏振性能越好<sup>[15]</sup>。文中设计的结构仅在零级衍射级次对 TE 和 TM 波进行反射和透射。定义 TM 波在 0 级次的透射消光比  $ER(T)$  和 TE 波在 0 级次的反射消光比  $ER(R)$  分别为:

$$ER(T)=10\times\log_{10}\left(\frac{T_{TM}}{T_{TE}}\right) \quad (1)$$

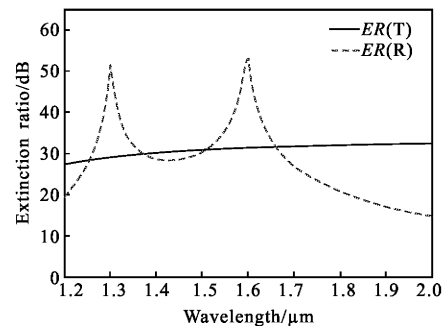
$$ER(R)=10\times\log_{10}\left(\frac{R_{TE}}{R_{TM}}\right) \quad (2)$$

式中:  $T_{TM}$ 、 $R_{TM}$  分别表示 TM 波 0 级的透射和反射的衍射效率;  $T_{TE}$ 、 $R_{TE}$  分别表示 TE 波 0 级的透射和反射效率。随着入射光的变化,该结构的衍射效率及消光比如图 3 变化,消光比在 1.3  $\mu\text{m}$  和 1.6  $\mu\text{m}$  附近出现峰值,这两点恰对应于 TM 偏振光反射效率的最小值点。



(a) 衍射效率随波长的变化曲线

(a) Diffraction efficiency versus the wavelength



(b) 消光比随波长的变化曲线

(b) Extinction ratio versus the wavelength

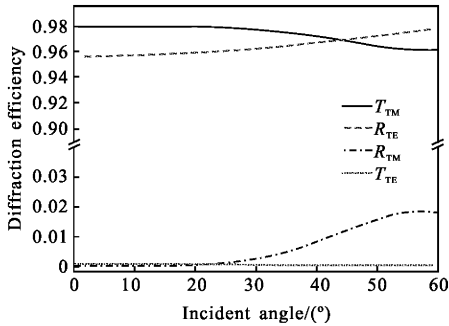
图 3 TM 和 TE 波的衍射效率及消光比关于波长的曲线

Fig.3 Diffraction efficiency of both TM and TE polarizations and extinction ratio as a function of wavelength

### 2.2 入射角度对衍射效率的影响

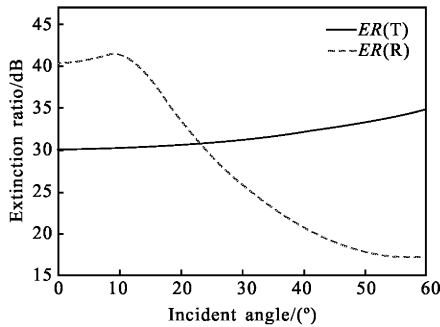
入射角度的变化对衍射效率也有明显的影响,图 4 显示了优化的结构在入射波长为 1 550 nm 时衍射效率与入射角的关系。如图所示这种结构具有较大的角度容差。在  $0^\circ\sim 45^\circ$  的入射角范围内, TM 和 TE 偏振波的衍射效率分别大于 96% 和 95%, 在  $-45^\circ\sim 0^\circ$  范围内其衍射效率也是分别大于 96% 和 95%。相应的消光比分别在 30~33 dB 和 40~20 dB 范围内变

化。这证实了该结构的大角度容差,在较宽入射角范围内实现了入射光的偏振分束,消光比在传输模式下稳步上升。



(a) 衍射效率随入射角的变化曲线

(a) Diffraction efficiency versus the incident angle



(b) 消光比随入射角的变化曲线

(b) Extinction ratios versus the incident angle

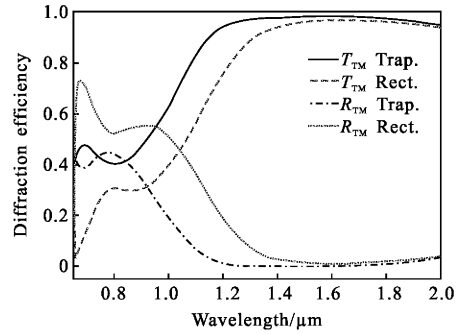
图 4 TM 和 TE 偏振光的衍射效率及消光比关于入射角的变化曲线

Fig.4 Diffraction efficiency of both TM and TE polarizations and extinction ratio as a function of incident angle

### 2.3 倒梯形光栅结构与矩形光栅结构的对比

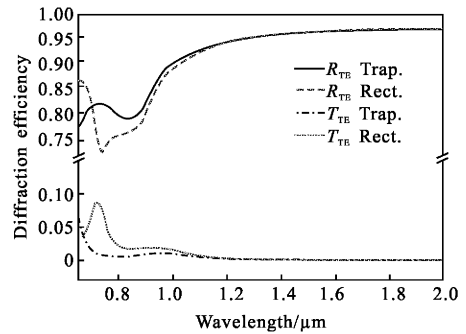
由图 2 可知高折射率介质层的厚度为 100 nm 时,倒梯形光栅结构的透射效果与反射效果都相对较好,对比一下双层矩形金属光栅和双层倒梯形金属光栅结构的透射率,双层矩形光栅的结构是参考文献[7]的结构。经过对比可以明显看到在近红外光波段,双层倒梯形金属光栅结构的透射效率明显优于双层矩形金属光栅的透射率,如图 5(a)所示。并且在 0.6~1.2 μm 波段,效果最为明显。倒梯形光栅结构的反射效率也略优于矩形光栅结构的反射效率。这是由于倒梯形结构增强了双层金属之间的耦合使其谐振效果增强,入射光被光刻胶的底切结构反射并耦合到金属上形成表面等离子波导模式,使更多的能量限制在底部的光刻胶-铝界面,通过增加

光栅间的间隔来增强近场耦合,可以改善 TM 偏振的透射率;并且在不损失反射效率的情况下,适当减小下层金属的宽度  $\Lambda$ , 都使得透射效率有所提高。图 5 中 Trap.是倒梯形结构的缩写,Rect.是矩形结构的缩写。



(a) 透射效率对比图

(a) Comparison of transmission efficiency



(b) 反射效率对比图

(b) Comparison of reflection efficiency

图 5 在近红外光波段两种不同光栅结构的衍射效率对比图

Fig.5 Comparison of diffraction efficiencies of two different grating structures in the near-infrared light band

### 2.4 不同倒梯形结构对衍射效率的影响

对于 PBS 而言,倒梯形光栅的斜边与底边所构成倾斜角的变化也会引起 PBS 光学性质的明显变化。不过随着角度的变化,光栅加工的工艺也有所不同,难度也会有明显的变化。按照上文的参数设计出的倒梯形光栅斜边与底边所成的角度是 45.707°。保持倒梯形上底边与下底边的长度不变,改变光刻胶光栅的高度即改变侧边与底边的倾斜角度来观察其衍射效率的变化。

如图 6 所示,在波长为 1550 nm 处,光刻胶的厚度在 0~1.8 μm 范围内变化, TM 偏振波的透射效率和 TE

偏振波的反射效率都强烈振荡,因为透过第一光栅的光被第二光栅部分反射并且在两个光栅之间来回传播而导致在某些间隔处产生相长干涉或相消干涉,这是法布里-珀罗效应引起的,如参考文献[13]中所述。

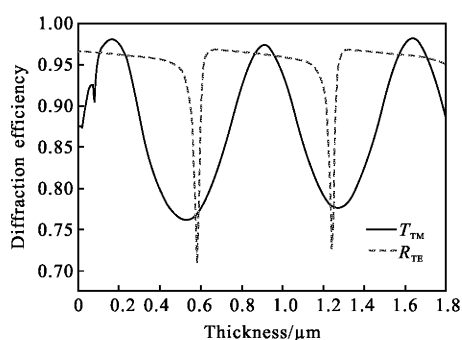


图 6 衍射效率随倒梯形光刻胶厚度的变化曲线

Fig.6 Diffraction efficiency versus the thickness of inverted trapezoidal photoresist

### 3 结论

文中基于严格耦合波理论设计了一种基于高折射率介质层的倒梯形双层金属光栅结构的偏振分束器。光栅的结构使用 RCWA 算法进行优化,发现其高透射率是由两个金属层之间的表面等离子体波导的近场耦合造成的。对于 TE 光,光刻胶不支持波导模式且没有表面等离子体耦合,所以大部分光被反射回来。提出的具有倒梯形轮廓的新型偏振器,有助于通过在光刻胶和底部铝壁附近限制更多的 TM 光来改善近场耦合,其在 1 290~1 840 nm 的入射波长范围内, TM 偏振光的透射效率和 TE 偏振光的反射效率都可以达到 97% 以上,消光比在 1 250~1 690 nm 处都达到了 27 dB 以上;此外改变倒梯形光刻胶的高度及宽度, TM 和 TE 偏振光的衍射效率会产生强烈振荡,双层光栅间形成法布里-珀罗腔。文中设计的 PBS 简化结构有望在众多光学系统中所应用,其在激光器系统、偏振成像、光学偏振器件等领域皆具有广泛的应用前景。

#### 参考文献:

[1] Salvekar A A, Scherer A, Cheng C C, et al. Design, fabrication, and characterization of form-birefringent multilayer polarizing beam splitter[J]. *Journal of the Optical*

*Society of America A*, 1997, 14(7): 1627-1636.

[2] Sun X, Alam M Z, Aitchison J S, et al. Compact and broadband polarization beam splitter based on a silicon nitride augmented low-index guiding structure [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(1): 163-166.

[3] Wu Na, Tan Xin, Yu Haili, et al. Design and fabrication of broadband holographic ion beam etching gratings [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1978-1983. (in Chinese)

[4] Aitchison J S, Mo M, Xiao S. Realization of an ultra-compact polarization beam splitter using asymmetric MMI based on silicon nitride/silicon-on-insulator platform [J]. *Optics Express*, 2017, 25(7): 8296-8305.

[5] Luo Zhenyue, Zhang Guiju, Zhu Ruidong, et al. Polarizing grating color filters with large acceptance angle and high transmittance[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(1): 70-76.

[6] Zheng Guoxing, Liu Guogen, Kenney M G, et al. Ultracompact high-efficiency polarising beam splitter based on silicon nanobrick arrays[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6749-6757.

[7] Wang Qi, Cao Shuhua, Du Yonghao, et al. Broadband polarizing beam splitter based on two-layer metal grating with a high refractive index dielectric layer [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2017, 140: 268-272.

[8] Guan Xiaowei, Wu Hao, Dai Daoxin. Silicon hybrid surface plasmonic nano-optics-waveguide and integration devices[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 181-195. (in Chinese)

[9] Chu Jinkui, Wang Zhiwen, Zhang Yingjie, et al. Multi-orientated wire-grid polarizer and its application to polarization navigation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(10): 2237-2244. (in Chinese)

[10] Wang Xuefei, Lu Zhenwu, Wang Taisheng, et al. Grating diffractive behavior of surface plasmon wave on meta-surface [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(1): 60-73. (in Chinese)

[11] Tong Qing, Rong Xing, Zhang Xinyu, et al. Large-area arrayed liquid crystal device for measuring and regulating polarization state of incident light [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 474-478. (in Chinese)

[12] Lu Bin, Wang Haitao, Shen Jun, et al. A high extinction ratio THz polarizer fabricated by double-bilayer wire grid structure[J]. *Aip Advances*, 2016, 6(2): 1127.

[13] Ye Zhicheng, Peng Yao, Zhai Tianrui, et al. Surface plasmon-mediated transmission in double-layer metallic

- grating polarizers [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2011, 28(3): 502–507.
- [14] He Sailing, Xue Wei, Zhang Yuan, et al. A broad-angle polarization beam splitter based on a simple dielectric periodic structure[J]. *Optics Express*, 2007, 15(22): 14363–14368.
- [15] Wang Bo. Suppression of the zeroth order by a mixed metal dielectric grating [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(1): 1–6.
- [16] Ji Shuying, Kong Weijin, Li Na, et al. Subwavelength sandwiched metal polarizing beam grating for 800 nm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(8): 0820002. (in Chinese)
- [17] Pommet D A, Grann E B, Moharam M G, et al. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, 12(5): 1068–1076.