

# 深紫外光栅反常偏振器件的设计与分析

张冲<sup>1,2</sup>, 胡敬佩<sup>1,2\*</sup>, 周如意<sup>1,2</sup>, 刘铁诚<sup>1,2</sup>, Sergey Avakaw<sup>3</sup>, 曾爱军<sup>1,2\*\*</sup>, 黄惠杰<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学材料与光电工程中心, 北京 100049;

<sup>3</sup>白俄罗斯共和国开放式股份公司“精密电子机械制造设计局-光学机械设备”, 白俄罗斯 明斯克 220033

**摘要** 为实现金属光栅偏振器件在光刻机偏振照明系统中的应用, 基于共振域光栅的反常偏振效应, 提出一种以二氧化硅为基底、铝与氟化镁作为栅线材料的介质-金属光栅偏振器。与传统的亚波长金属光栅偏振器相比, 该偏振器的光栅周期接近入射波长(0.19~0.20  $\mu\text{m}$ ), 表现出透射 TE 偏振光、反射 TM 偏振光的反常特性。由时域有限差分算法(FDTD)的数值模拟结果可得, 当波长为 0.193  $\mu\text{m}$  的光垂直入射时, 该光栅偏振器对 TE 偏振光的透过率大于 60%, 偏振消光比大于 180。与具有相同结构参数和栅线材料的单层金属光栅偏振器相比, 该介质-金属光栅偏振器在深紫外波段具有良好的偏振性能, TE 偏振光透过率提升了约 10%, 偏振消光比提升了 4.5 倍左右(在 0.193  $\mu\text{m}$  波长下)。

**关键词** 激光光学; 深紫外波段; 共振域光栅; 反常偏振效应; 光栅偏振器件; 偏振性能

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0301005

## Design and Analysis of Inverse Polarization Grating Devices for Deep Ultraviolet Light

Zhang Chong<sup>1,2</sup>, Hu Jingpei<sup>1,2\*</sup>, Zhou Ruyi<sup>1,2</sup>, Liu Tiecheng<sup>1,2</sup>,  
Sergey Avakaw<sup>3</sup>, Zeng Aijun<sup>1,2\*\*</sup>, Huang Huijie<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Information Optics and Optoelectronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>Company of KBTEM-OMO Republication Unitary Scientific and Production Enterprise, Minsk 220033, Belarus

**Abstract** To realize the application of a metal grating polarizer in a polarization illumination system for photolithography, a dielectric-metal grating polarizer based on the inverse polarization effect of a resonant-domain grating is proposed. The grating comprises aluminum (Al), magnesium fluoride ( $\text{MgF}_2$ ), and a silicon dioxide ( $\text{SiO}_2$ ) substrate. In comparison with general sub-wavelength metallic gratings, the period of the proposed polarizer is close to the wavelength of the incident light (0.19–0.20  $\mu\text{m}$ ), and it exhibits the inverse polarization effect of transmitting transverse electric (TE) polarized light and reflecting transverse magnetic (TM) polarized light. Finite difference time domain (FDTD) simulation results indicate that the transmittance of TE-polarized light exceeds 60% and the polarization extinction ratio is greater than 180 when light having a wavelength of 0.193  $\mu\text{m}$  is incident normally. In comparison with a single-layer metal grating polarizer constructed using the same materials and structural parameters, the proposed dielectric-metal grating polarizer exhibits better polarization performance in the deep ultraviolet band, with the transmittance and extinction ratio approximately increased by 10% and 4.5 times at wavelength of 0.193  $\mu\text{m}$ , respectively.

**Key words** laser optics; deep ultraviolet band; resonant-domain grating; inverse polarizing effect; grating

收稿日期: 2019-09-04; 修回日期: 2019-10-11; 录用日期: 2019-10-28

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61805264)、政府间国际科技创新合作重点专项(2016YFE0110600)、上海市科技人才计划(17YF1429500)、上海市青年科技英才扬帆计划(18YF1426500)、上海市自然科学基金(19ZR1464300)

\* E-mail: hujingpei@siom.ac.cn; \*\* E-mail: aijunzeng@siom.ac.cn

polarizer; polarization performance

OCIS codes 140.3295; 230.3990; 230.1950

## 1 引 言

随着半导体工业和纳米技术的发展,人们对具有高分辨率的新一代光刻技术的需求更加迫切。根据瑞利方程可知,增大数值孔径和降低曝光波长可以提高光刻系统的分辨率。然而,随着数值孔径的不断增大,照明光束的偏振特性成为影响系统成像质量的重要因素,因此照明系统中光束偏振态的纯化与检测尤为重要<sup>[1-5]</sup>。常见的用于光束偏振态纯化与检测的器件有晶体棱镜、二向色性偏振片、玻璃片堆以及偏振分光膜等<sup>[6-8]</sup>。上述偏振器件一般存在体积较大或光束满足特殊角度入射才能工作等缺点,难以实现系统的集成化与小型化。

近些年,亚波长金属线栅偏振器因具有体积小、易于集成、偏振特性好等优势而被广泛用于可见光波段和红外波段激光的起偏<sup>[9-10]</sup>。随着纳米技术的不断发展,深紫外波段亚波长金属线栅偏振也引起了人们的关注。然而,在深紫外波段(100~200 nm),传统偏振光栅器件的周期需小于40 nm才能具有良好的偏振性能,这对当下纳米器件的制备来说是很大的挑战。与传统的偏振光栅相比,共振域光栅(光栅周期在波长的一半到两倍之间)更易制作,且具有一定的偏振性能,因而引起了人们的注意。Wang等<sup>[11]</sup>提出了周期为118 nm的铝线栅偏振器,在波长266 nm处TM偏振光的透过率可达65%,消光比约为200。Weber等<sup>[12]</sup>基于铱材料良好的光学性能和优异的抗氧化性能,设计了周期为100 nm的铱线栅偏振器,在波长250 nm处TM偏振光的透过率约为45%,消光比约为87。为进一步缩短线栅偏振器的入射波长,Weber等<sup>[13]</sup>又以钨为光栅材料,设计了周期为100 nm的钨线栅深紫外偏振器件,在波长193 nm处,TM光的透过率为40%,消光比为22。然而,上述亚波长金属线栅偏振器的光栅周期小,难以制作,且当周期远小于入射波长时,光栅的偏振比更高。对于193 nm的入射波长,要想得到偏振比高的光栅偏振器,所需的光栅周期更小,也更难以制作。近期研究发现,当金属光栅周期接近入射波长,即光栅为共振域金属光栅时,在可见光甚至深紫外波段范围内会出现反常偏振效应<sup>[14-15]</sup>,即透射TE偏振光而反射TM偏振光。为了解决深紫外波段亚波长光栅偏振器件周期较小、

制作困难的问题,Kang等<sup>[16]</sup>基于这种反常的偏振效应,利用周期为176 nm的铝线栅,在193 nm波长下实现了透过率接近40%、消光比约为45的偏振器件的设计与制备。为进一步增强这种反常的偏振效应,Kang等<sup>[17]</sup>又提出一种周期为170 nm的混合型Al-SiO<sub>2</sub>光栅偏振器,其消光比可达3000以上,然而其目标波长为196 nm,透过率仅在30%左右,不满足浸没式光刻机照明系统的实际应用需求。

本文基于共振域金属光栅的反常偏振效应,针对浸没式光刻机照明系统所用波长,设计出一种透射式介质-金属光栅偏振器。根据菲涅耳公式可知,在基底上添加比基底材料折射率小的介质光栅层,可以提高光栅的透过率,因此该设计在传统单层金属线栅的金属层与基底材料之间加入低折射率增透介质层,以提高光栅的偏振性能。已知氟化镁在深紫外波段的透过性好,对光的折射率和吸收率低,且氟化镁薄膜的制备工艺较为成熟,因此将其作为该反常偏振器件增透介质层的制备材料。对于金属光栅材料,本文选用了在深紫外波段具有较高透过率和偏振性能良好的铝。时域有限差分算法(FDTD)的数值模拟结果表明,在0.193 μm波长处,该光栅的TE偏振光透过率大于60%,消光比大于180。本文设计的金属偏振器件在理论上可用于浸没式光刻机照明系统中光束偏振态的检测,并能有效减小检测系统的体积。

## 2 介质-金属光栅偏振器件的设计与优化

### 2.1 介质-金属光栅偏振器件的单元设计

图1所示为本文提出的介质-金属光栅偏振器的结构示意图,该光栅偏振器由铝光栅层、氟化镁光栅层以及二氧化硅基底组成,线栅周期为 $P$ ,宽度为 $W$ ,氟化镁光栅层和铝光栅层的高度分别为 $H_1$ 和 $H_2$ 。首先,采用基于时域有限差分法的商业软件(Lumerical FDTD solutions, Canada)对该光栅偏振器的偏振特性进行数值模拟与结构参数的优化分析。在数值模拟过程中,需要对结构单元计算区域的边界条件进行定义,本文对 $Z$ 轴方向上的边界应用完美匹配层边界条件(PML),在 $X$ 轴和 $Y$ 轴方向上应用周期性边界条件(PBC)。其中铝光栅层的介电常数采用CRC,二氧化硅基底层和氟化镁光栅层的介电常数采用Palik。TM偏振光(电场方向垂

直于栅线)和 TE 偏振光(电场方向平行于栅线)分别沿 Z 轴正方向从二氧化硅基底垂直入射,波长范围为  $0.19 \sim 0.20 \mu\text{m}$ ,优化过程要尽可能提高光栅结构的 TE 偏振光透过率和消光比。

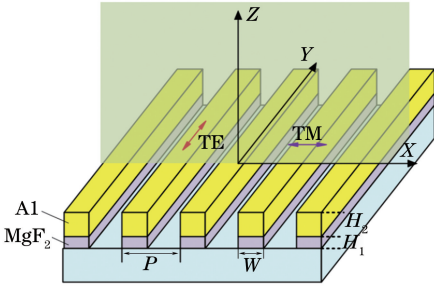


图 1 以  $\text{SiO}_2$  为基底的  $\text{MgF}_2$ -Al 光栅结构示意图  
Fig. 1 Schematic of  $\text{MgF}_2$ -Al grating structure based on  $\text{SiO}_2$  substrate

### 2.2 $\text{MgF}_2$ -Al 光栅结构周期(P)的优化

为提高深紫外波段下  $\text{MgF}_2$ -Al 光栅结构的偏振性能,首先在  $0.190 \sim 0.200 \mu\text{m}$  波段研究光栅周期 P 对 TE 和 TM 偏振光透过率以及消光比(TE 偏振光与 TM 偏振光透过率之比)的影响,优化过

程中保持结构参数  $H_1 = 30 \text{ nm}$ 、 $H_2 = 110 \text{ nm}$ 、 $W = 85 \text{ nm}$  不变。从图 2(a)可以看出,随着周期的增加,TE 偏振光的透过率呈现先增大后减小的趋势,而 TM 偏振光透过率在短波段内 ( $0.190 \sim 0.193 \mu\text{m}$ ) 增大,在较长波段内 ( $0.195 \sim 0.2 \mu\text{m}$ ) 持续降低。相应的消光比曲线如图 2(b)所示,随着周期的增加,消光比的峰值出现红移现象。这主要是由于 TM 偏振光的透过率对消光比的影响较大,随着 TM 偏振光透过率的谷值发生红移,消光比对应的峰值也随之变化。从物理机制层面可以理解为:由于反常偏振效应的极值点接近瑞利波长<sup>[18-19]</sup>,并受瑞利共振异常的影响(TM 光的透过率急剧下降),而周期 P 直接决定着瑞利波长的位置,因此随着周期 P 的变化,消光比峰值会发生移动。偏振器件的偏振性能达到最佳状态的标准如下:在同一结构参数下,光栅的 TE 偏振光透过率和消光比同时取最大值。对于目标波长  $0.193 \mu\text{m}$ ,当周期  $P = 178 \text{ nm}$  时,TE 偏振光的透过率最大,为 62%,光栅的消光比也达到最大,为 187。

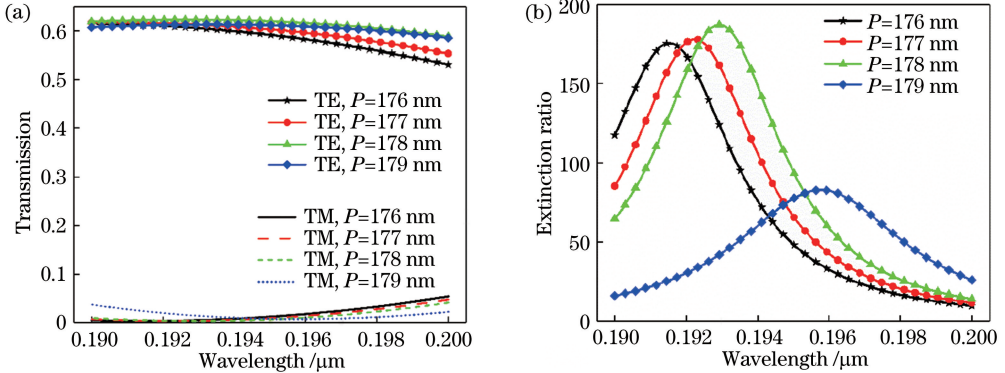


图 2  $\text{MgF}_2$ -Al 偏振光栅的透过率和消光比随光栅周期 P 的变化关系。

(a)光栅的透过率曲线;(b)光栅相应的消光比曲线

Fig. 2 Transmission and extinction ratio of  $\text{MgF}_2$ -Al polarization grating versus grating period P.

(a) Transmission curves of the grating; (b) corresponding extinction ratio curves of the grating

### 2.3 $\text{MgF}_2$ -Al 光栅结构中线栅宽度(W)的优化

线栅宽度 W 对偏振光栅 TE 偏振光透过率和消光比的影响如图 3(a)、(b)所示,模拟过程中保持结构参数  $P = 178 \text{ nm}$ 、 $H_1 = 30 \text{ nm}$ 、 $H_2 = 110 \text{ nm}$  不变。可以将所设计的光栅看作是由金属-空气-金属这种周期性结构组成的类法布里-珀罗(F-P)共振腔<sup>[20]</sup>。电磁波在狭缝中传播时,狭缝内可以产生表面等离子,而且表面等离子通过共振腔进行传播。当 P 不变、W 变化时,光栅的占空比发生变化,在共振腔中传播的表面等离子体的波长<sup>[21-22]</sup>也随之变化,因此偏振光对应的透过率和消光比也发生相应变

化。从图 3 可以看出;当线栅宽度 W 在  $83 \sim 85 \text{ nm}$  范围内时,随着线栅宽度的增加,TE 光透过率几乎不变,TM 光透过率在长波段范围内 ( $0.190 \sim 0.197 \mu\text{m}$ ) 呈减小趋势,与该波段对应的消光比呈增加趋势;当线栅宽度 W 在  $85 \sim 89 \text{ nm}$  范围内时,TE 光透过率对线栅宽度的变化比较敏感,随着线栅宽度的增加,TE 光透过率在整个波段范围内呈减小趋势,而 TM 光透过率几乎不变,因此与之对应的消光比呈增加趋势。波长在  $0.190 \sim 0.197 \mu\text{m}$  范围内时,线栅宽度  $W = 85 \text{ nm}$  对应的偏振器的偏振性能最优。

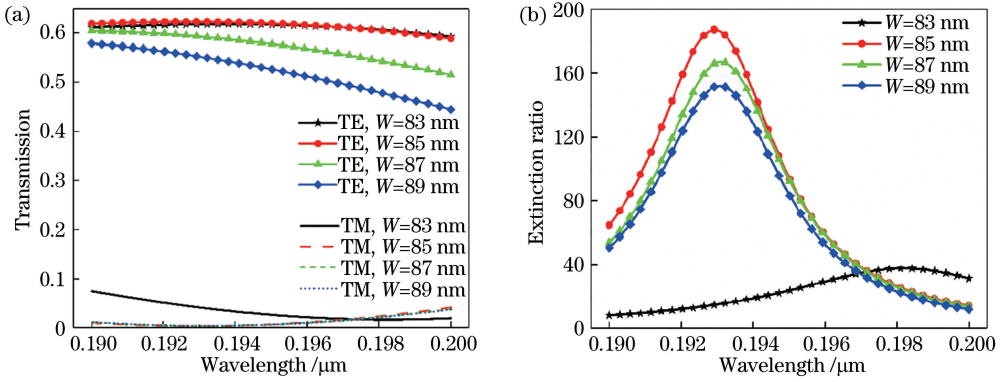


图 3  $\text{MgF}_2$ -Al 偏振光栅的透过率和消光比随光栅线栅宽度  $W$  的变化。

(a) 光栅的透过率; (b) 光栅相应的消光比

Fig. 3 Transmission and extinction ratio of  $\text{MgF}_2$ -Al polarization grating versus grating width  $W$ .

(a) Transmission curves of the grating; (b) corresponding extinction ratio curves of the grating

### 2.4 $\text{MgF}_2$ -Al 光栅结构中铝光栅层高度 ( $H_2$ ) 和氟化镁光栅层高度 $H_1$ 的优化

铝光栅层高度  $H_2$  的变化对 TE 和 TM 偏振光透过率的影响如图 4(a) 所示, 模拟过程中其他结构参数 ( $P=178$  nm,  $W=85$  nm,  $H_1=30$  nm) 保持不变。由图 4(a) 可以看出, 随着铝光栅层高度的增加, 介质-金属光栅偏振器的 TE 偏振光透过率呈周期性振荡衰减, 而 TM 偏振光透过率先以指数型衰减, 再呈现缓慢的周期性振荡衰减。TE 和 TM 偏振光透过率呈现的周期性振荡现象是由金属光栅层上下两个界面间形成的类 F-P 谐振腔内的干涉效应引起的, 其中金属光栅层的高度可以等效为 F-P 腔的腔长。因此, 随着 F-P 腔腔长的增加, TE 和 TM 偏振光的透过率呈现周期性的振荡。此外, 由于金属对光波有吸收作用, 随着金属高度的增加, 光波能量的损耗增加, 所以透射率曲线呈总体性衰减。值得注意

的是, TE 和 TM 偏振光透过率的衰减周期不同, TE 偏振光透过率的峰值位置并不对应于 TM 偏振光透过率的谷值位置。权衡光栅偏振器的透过率和消光比后, 选择器件的铝光栅层高度  $H_2=110$  nm。

氟化镁光栅层高度  $H_1$  的变化对 TE 和 TM 偏振光透过率的影响如图 4(b) 所示, 模拟过程中其他结构参数 ( $P=178$  nm,  $W=85$  nm,  $H_2=110$  nm) 保持不变。可以看出, 随着氟化镁光栅层高度的增加, TE 偏振光透过率呈现周期性变化, TM 偏振光透过率整体上变化得比较缓慢。金属光栅层的上下表面可以分别与基底上表面形成类 F-P 谐振腔, 随着介质光栅层高度的增加, 两个类 F-P 谐振腔的腔长随之变化, 谐振腔之间的耦合作用导致 TE 透过率发生周期性变化。TM 透过率的最小值对消光比的影响最大, 由图 4(b) 可知, 最佳介质光栅层高度  $H_1=30$  nm。

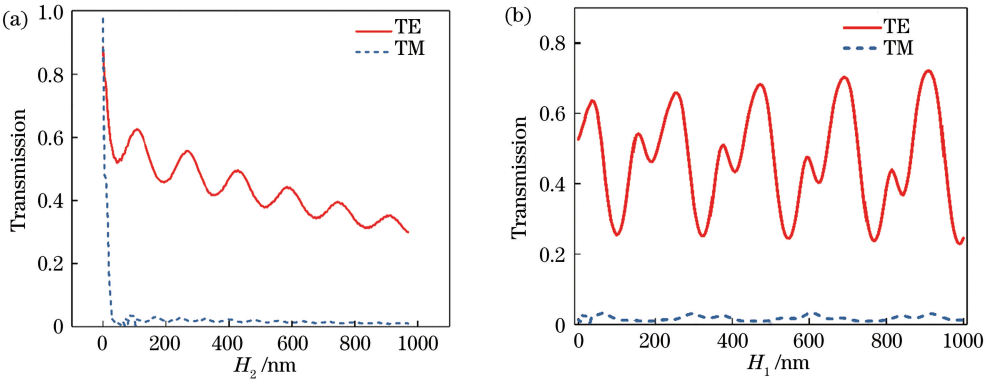


图 4  $\text{MgF}_2$ -Al 偏振光栅的透过率随光栅高度的变化。

(a) 光栅的透过率随铝光栅层高度  $H_2$  的变化; (b) 光栅的透过率随氟化镁光栅层高度  $H_1$  的变化

Fig. 4 Transmission of  $\text{MgF}_2$ -Al polarization grating as functions of the grating heights. (a) Transmission of the grating versus the height of Al grating layer  $H_2$ ; (b) transmission of the grating versus the height of  $\text{MgF}_2$  grating layer  $H_1$

### 2.5 MgF<sub>2</sub>-Al 光栅与传统单层 Al 光栅的偏振性能对比

为了证明介质光栅层具有提升光栅偏振性能的优势,将 MgF<sub>2</sub>-Al 光栅与单层 Al 光栅偏振特性的理论计算结果进行对比。图 5(a)、(b) 分别为 MgF<sub>2</sub>-Al 光栅结构和单层 Al 光栅结构的剖面图,与单层 Al 光栅结构相比,MgF<sub>2</sub>-Al 光栅结构在金属光栅层和基底之间增加了  $H_1=30\text{ nm}$  的 MgF<sub>2</sub> 光栅层,除此之外两者的其他结构参数完全相同 ( $P=178\text{ nm}, W=85\text{ nm}, H_2=110\text{ nm}$ )。为了使结果更具说服力,本文同时对比了 Kang 等<sup>[16]</sup> 优化后的单层 Al 光栅结构的透过率和消光比,结果如图 5(c)、(d) 所示。

由菲涅耳公式可知,在基底上添加折射率小于基底材料的介质光栅层可以提高光栅的透过率。已

知氟化镁材料对深紫外波段光波的透过性好,相比于氟化镧(LaF<sub>3</sub>)、氟化钙(CaF<sub>2</sub>)等拥有更低的折射率,常被用作该波段的增透材料。从图 5(c) 可以看出,在深紫外波段( $0.190\sim 0.200\ \mu\text{m}$ ),MgF<sub>2</sub>-Al 光栅结构的 TE 偏振光透过率的均值在 61% 左右,大于与其同参数的单层 Al 光栅结构(以下简称“铝光栅结构”)以及文献[16]中优化后的单铝光栅结构(以下简称“优化的铝光栅结构”)的透过率最大值(分别为 55%、52%)。针对目标波长  $193\ \mu\text{m}$  处光栅结构的消光比,由图 5(d) 可以看出,MgF<sub>2</sub>-Al 光栅结构的消光比大于 180,而铝光栅结构以及优化的铝光栅结构的消光比分别在 110 和 40 左右。综合以上数据可知,在入射波长  $0.193\ \mu\text{m}$  处, MgF<sub>2</sub>-Al 光栅结构较单层 Al 光栅结构具有更好的偏振性能。

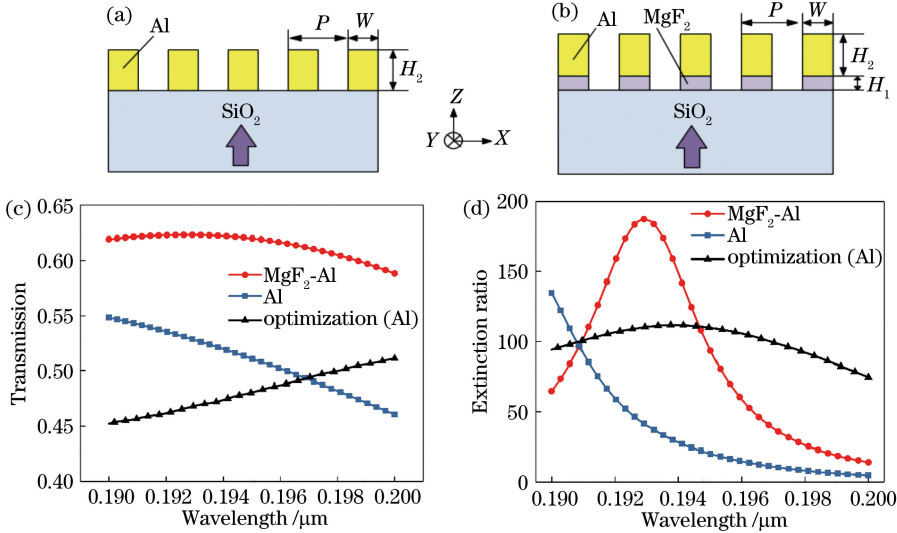


图 5 单层 Al 光栅和 MgF<sub>2</sub>-Al 光栅结构示意图,以及三种光栅结构的透过率和消光比随入射波长的变化。(a) Al 光栅偏振器件的结构剖面图;(b) MgF<sub>2</sub>-Al 光栅偏振器的结构剖面图;(c) 三种不同光栅在不同波长下的透过率;(d) 三种不同光栅在不同波长下的消光比

Fig. 5 Structures of single-layer Al grating and MgF<sub>2</sub>-Al grating, and the relationship between transmittance or extinction ratio of three grating structures and incident wavelength. (a) Structural cross-sectional views of Al-grating polarizer; (b) structural cross-sectional views of MgF<sub>2</sub>-Al grating polarizer; (c) transmittance of three gratings with different structures at different wavelengths; (d) extinction ratio of three gratings with different structures at different wavelengths

### 3 反常偏振效应机理的分析

为了解释 MgF<sub>2</sub>-Al 光栅偏振器件在深紫外波段( $0.190\sim 0.20\ \mu\text{m}$ )内的反常偏振效应机理,本节取第 2 节光栅优化后的结构参数( $P=178\text{ nm}, W=85\text{ nm}, H_1=30\text{ nm}, H_2=110\text{ nm}$ ),采用 FDTD 软件模拟得到了 TM 和 TE 偏振光垂直入射时光栅的透射率、反射率、吸收率随入射波长的变化关系,如图 6(a)、(b) 所示。在深紫外波段范围内,由图 6(a)

可知,当 TM 偏振光入射时,大多数光被光栅反射,只有极少数光可以通过光栅;由图 6(b) 可知,当 TE 偏振光入射时,多数光可以通过光栅进行传播,其余光的大部分被反射,小部分被吸收。因此,不同于传统的透射 TM 偏振光而反射 TE 偏振光的亚波长金属光栅,该 MgF<sub>2</sub>-Al 光栅结构具有相反的偏振效应,即透射 TE 偏振光而反射 TM 偏振光,通常称之为反常偏振效应。

为了更深入地了解光栅产生反常偏振效应的

机理,分别给出了波长为  $0.193\ \mu\text{m}$  的 TM 和 TE 偏振光入射时光栅内部的电场分布,如图 7(a)、(b)所示。当 TM 偏振光入射时,由表面等离子体(SPP)波长公式<sup>[23]</sup>可得, $\lambda_{\text{SPP}} = 0.195\ \mu\text{m}$ ,与入射光波长  $0.193\ \mu\text{m}$  接近。由图 7(a)可以看出, TM 偏振光在金属-空气界面激发的表面等离子波的共

振效应抑制了光波的透射。而 TE 偏振光无法满足表面等离子体的波矢匹配条件,不能激发表面等离子体共振效应,由图 7(b)可以看出,光波透过光栅区域传播。因此,该光栅在深紫外波段具有透射 TE 偏振光、反射 TM 偏振光的反常偏振效应。

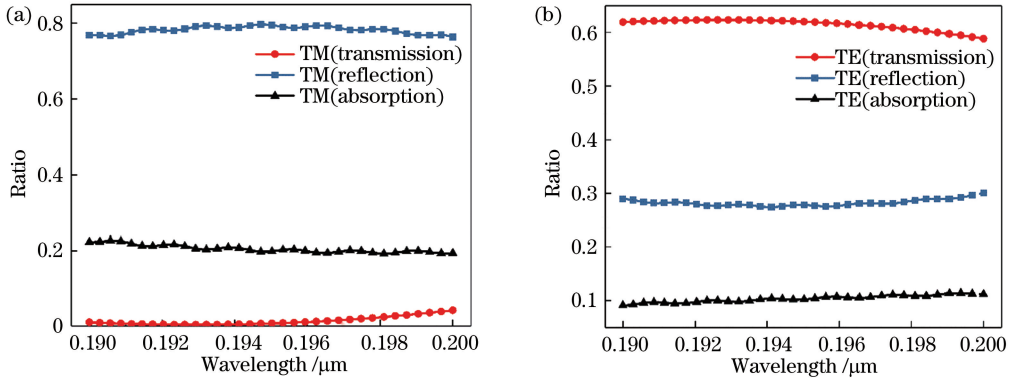


图 6  $\text{MgF}_2\text{-Al}$  光栅在不同偏振光下的透射率、反射率和吸收率。(a) TM 偏振光; (b) TE 偏振光  
Fig. 6 Transmission, reflection and absorption of  $\text{MgF}_2\text{-Al}$  grating under different polarized light as a function of incident wavelength. (a) TM polarized light; (b) TE polarized light

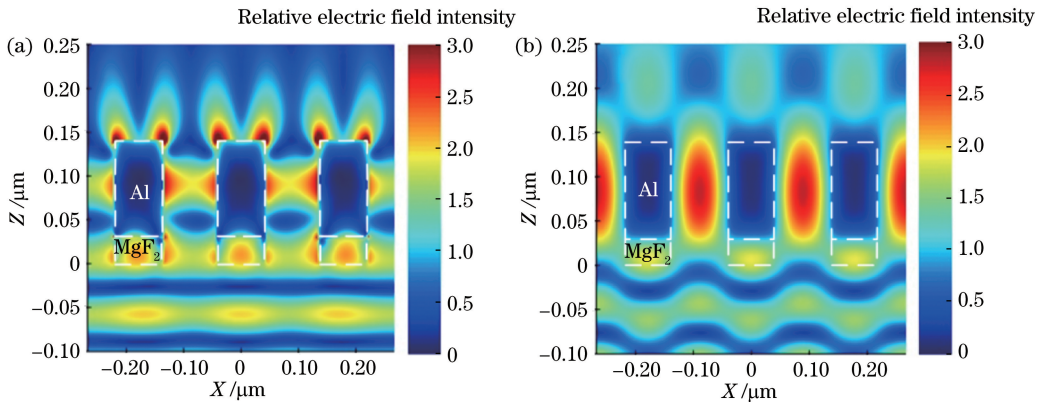


图 7  $0.193\ \mu\text{m}$  入射波长下不同偏振光正入射时的光栅电场图。(a) TM 偏振光; (d) TE 偏振光  
Fig. 7 Grating electric field diagram of different polarized light at normal incidence at incident wavelength of  $0.193\ \mu\text{m}$ . (a) TM polarized light; (b) TE polarized light

## 4 结 论

本文基于共振域光栅的反常偏振效应,利用 FDTD 设计并优化了一种在入射波长  $0.193\ \mu\text{m}$  下具有良好偏振性能的介质-金属( $\text{MgF}_2\text{-Al}$ )光栅偏振器件。数值模拟结果表明, $\text{MgF}_2\text{-Al}$  光栅偏振器在波长  $0.193\ \mu\text{m}$  下的 TE 偏振光透过率大于 60%,消光比大于 180,相比于具有相同结构参数的单层铝光栅偏振器分别提升了约 10%和 4.5 倍左右。此外,不同于传统的光栅偏振器件,该光栅偏振器件的周期为 178 nm,接近入射波长,便于深紫外波段范围内工作器件的加工制作,因此在光通信、偏振成像

系统等中具有广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Soufli R, Hudyma R M, Spiller E, et al. Sub-diffraction-limited multilayer coatings for the 0.3 numerical aperture micro-exposure tool for extreme ultraviolet lithography[J]. Applied Optics, 2007, 46 (18): 3736-3746.
- [2] Naulleau P P, Denham P E, Hoef B, et al. A design study for synchrotron-based high-numerical-aperture scanning illuminators [J]. Optics Communications, 2004, 234: 53-62.
- [3] Yuan Q Y, Wang X Z, Qiu Z C. Impact of polarized illumination on high NA imaging in ArF immersion

- lithography at 45 nm node[J]. *Optik*, 2009, 120(7): 325-329.
- [4] Jiang J H, Li Y Q, Shen S H, et al. Design of a high-numerical-aperture extreme ultraviolet lithography illumination system[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(20): 5673-5679.
- [5] Zhu B E, Li S K, Wang X Z, et al. High-order aberration measurement technique for immersion lithography projection lens based on multi-polarized illuminations[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0712004.  
诸波尔, 李思坤, 王向前, 等. 基于多偏振照明的浸没式光刻机投影物镜高阶波像差快速检测技术[J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 0712004.
- [6] Fellows N N, Sato H, Lin Y D, et al. Dichromatic color tuning with InGaN-based light-emitting diodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93 (12): 121112.
- [7] Ren H W, Fan Y H, Wu S T. Prism grating using polymer stabilized nematic liquid crystal[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(19): 3168-3170.
- [8] Soares L L, Cescato L. Metallized photoresist grating as a polarizing beam splitter [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(32): 5906-5910.
- [9] Dai M, Wan W W, Zhu X Y, et al. Broadband and wide angle infrared wire-grid polarizer [J]. *Optics Express*, 2015, 23(12): 15390-15397.
- [10] Yang Z Y, Lu Y F. Broadband nanowire-grid polarizers in ultraviolet-visible-near-infrared regions [J]. *Optics Express*, 2007, 15(15): 9510-9519.
- [11] Wang J J, Walters F, Liu X M, et al. High-performance, large area, deep ultraviolet to infrared polarizers based on 40 nm line/78 nm space nanowire grids[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90 (6): 061104.
- [12] Weber T, Käsebier T, Szeghalmi A, et al. Iridium wire grid polarizer fabricated using atomic layer deposition[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2011, 6: 558.
- [13] Weber T, Käsebier T, Helgert M, et al. Tungsten wire grid polarizer for applications in the DUV spectral range[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(16): 3224-3227.
- [14] Drauschke A, Schnabel B, Wyrowski F. Comment on the inverse polarization effect in metal-stripe polarizers[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2001, 3(1): 67-71.
- [15] Honkanen M, Kettunen V, Kuittinen M, et al. Inverse metal-stripe polarizers [J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 1999, 68(1): 81-85.
- [16] Kang G G, Vartiainen I, Bai B F, et al. Inverse polarizing effect of subwavelength metallic gratings in deep ultraviolet band [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(7): 071103.
- [17] Kang G, Rahomäki J, Dong J, et al. Enhanced deep ultraviolet inverse polarization transmission through hybrid Al-SiO<sub>2</sub> gratings[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(13): 131110.
- [18] Raether H. *Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings* [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1988.
- [19] Drauschke A, Schnabel B, Wyrowski F. Comment on the inverse polarization effect in metal-stripe polarizers[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2001, 3(1): 67-71.
- [20] He Q H, Wang G P. Physical mechanism for transmission enhancement of one-dimensional metallic gratings[J]. *Laser Journal*, 2003, 24(4): 29-30.  
何启浩, 汪国平. 一维金属光栅的透射光增强效应的物理机制[J]. *激光杂志*, 2003, 24(4): 29-30.
- [21] Yu Z, Liang R S, Chen P X, et al. Integrated tunable optofluidics optical filter based on MIM side-coupled-cavity waveguide [J]. *Plasmonics*, 2012, 7 (4): 603-607.
- [22] Wang Z W, Chu J K, Wang Q Y. Transmission analysis of single layer sub-wavelength metal gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0705002.  
王志文, 褚金奎, 王倩怡. 单层亚波长金属光栅偏振器透射机理研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35 (7): 0705002.
- [23] Huang C P, Wang Q J, Zhu Y Y. Dual effect of surface plasmons in light transmission through perforated metal films[J]. *Physical Review B*, 2007, 75(24): 245421.