

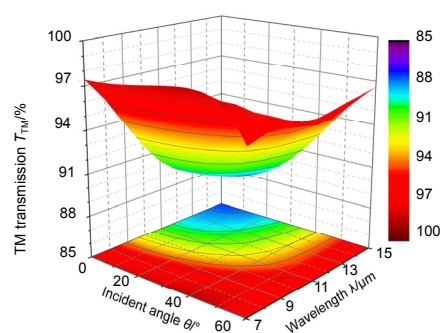


LWIR 亚波长铝/硒化锌光栅偏振器设计

黄战华^{1,2}, 马小青^{1,2*}, 朱攀^{1,2}, 张亚男^{1,2},
蔡怀宇^{1,2}, 张尹馨^{1,2}

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072;

²光电信息技术教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072



摘要: 为提高长波红外偏振成像系统中偏振器件性能, 本文通过分析光栅材料及结构参数对光栅偏振性能的影响, 设计并优化了一种双层材料构成的亚波长光栅。该光栅为矩形形貌, 光栅区由铝与硒化锌构成, 两种材料的厚度分别为 $0.6\ \mu\text{m}$ 和 $0.4\ \mu\text{m}$, 光栅周期 $1\ \mu\text{m}$, 占空比 50%。利用严格耦合波理论分析并计算该结构光栅的衍射效率, $7\sim 15\ \mu\text{m}$ 波段的光以 $0\sim 60^\circ$ 入射后其 0 级横磁模透射率达到 87.54% 以上, 消光比超过 47 dB。该光栅在 $10.6\ \mu\text{m}$ 的测试波长下, TM 透射率高达 90.80% 且具有 50 dB 以上的消光比, 相比槽深相同的单层铝光栅, 偏振透过率明显提高。仿真结果显示, 该光栅在整个宽长波红外波段具有良好的偏振性能。

关键词: 衍射光学; 双层亚波长光栅; 严格耦合波理论; 线栅偏振器; 长波红外

中图分类号: O436.3

文献标志码: A

Design of long-wavelength infrared polarizer based on sub-wavelength aluminum-ZnSe grating

Zhanhua Huang^{1,2}, Xiaoqing Ma^{1,2*}, Pan Zhu^{1,2}, Yanan Zhang^{1,2}, Huaiyu Cai^{1,2} and
Yinxin Zhang^{1,2}

¹College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; ²Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China

Abstract: A dual-layered sub-wavelength grating consisting of two kinds of materials, aluminum and ZnSe, is developed to improve the performance of polarimetric elements in long-wavelength infrared (LWIR) polarization imaging system. Parameters of the designed grating's morphological structure are optimized on the basis of analyzing the effects on the polarization performance through the rigorous coupled wave theory, which helpfully calculates the diffraction efficiency. With a rectangular profile, the grating designed for applications in LWIR band has periods of $1\ \mu\text{m}$ and 50%-fill-factor. The depths of aluminum and ZnSe in the grating region are $0.6\ \mu\text{m}$ and $0.4\ \mu\text{m}$ respectively. A TM transmission greater than 87.54% with an extinction ratio exceeding 47 dB is achieved in the $7\sim 15\ \mu\text{m}$ band when the angle of incidence is from zero to sixty degree. The grating maintains an extinction ratio better than 50 dB and TM transmission over 90.80% above $10.6\ \mu\text{m}$ incident wavelength, which is superior to single-layered aluminum gratings with the same depth in the transmission performance in comparison. The simulation results show that this grating has excellent polarization performance in the broad LWIR band.

Keywords: diffractive optics; dual-layered sub-wavelength gratings; rigorous coupled wave analysis (RCWA);

收稿日期: 2017-03-18; 收到修改稿日期: 2017-04-11

*E-mail: maxiaoqing@tju.edu.cn

1 引言

随着探测与传感器技术的发展,红外探测仪器的精度和灵敏度有所提高,然而传统红外热像仪对先验信息的依赖性及其难以精准区分小温度等测量短板大大限制了其适用性。光的偏振信息(偏振度、偏振方向、偏振椭圆率等)作为独立于振幅、相位、频率的光波信息,在导航、水面探测及模糊通信等方面具有独特的增补作用^[1,2]。红外偏振成像在红外热成像的基础上增加了偏振信息维度,能够增强对目标与干扰物或背景的材料、粗糙度、纹理等理化特性的区分,进而提高对伪装或隐蔽目标的探测能力^[3]。偏振器作为偏振成像系统中的核心部件,性能优劣十分重要。近年来微光刻与微/纳米加工技术及计算机设计辅助功能的不断发展使衍射光学元件备受青睐,光学光刻与电子束光刻的功能配合能够实现亚波长纳米结构图形的制造。亚波长光栅的偏振效应来源于光栅结构的各向异性,光栅区对光矢量的 TE/TM 模具有不同的等效折射率,这种差异使得 TE/TM 波的反射和透射效率呈现出较大区别。

最简单的线栅偏振器光栅区仅包含一排平行的金属线,有研究表明,在线栅与基底间镀抗反/增反膜的设计方式可以提高线栅偏振器性能。大连理工大学张娜、孟凡涛等^[4,5]通过在基底和光栅之间镀氟化镁薄膜,有效提高了理论透射率和消光比,但该类设计面临两个难点:氟化镁与玻璃基底的结合牢固度较差;较厚的氟化镁镀层加工工艺复杂。本文提出将亚波长金属铝栅下的硒化锌基底进行过度刻蚀的方式,能够有效降低制作难度。目前,经过纳米压印、金属沉积、化学机械抛光和等离子体刻蚀等步骤可制备相似的结构,Chia-Meng Chen 曾将该结构双层线栅偏振器应用于可见光波段^[6]。苏州大学的周阳等通过分析玻璃基底过刻蚀的高度与金属光栅偏振性能的关系,将原单层金属光栅设计进行了优化^[7]。安徽大学的廖艳林等设计出应用于反射式液晶显示器的金/二氧化硅双层光栅偏振片^[8],其 TM 反射率达到 92%,具有 7.34×10^3 的偏振比。

亚波长光栅偏振器具有集成度高、入射窗口大、损伤阈值高等特点^[9],本文针对长波红外波段的应用

对光栅材料和基底进行了选取,并利用严格耦合波理论分析光栅的结构参数对光栅偏振性能造成的影响,对光栅进行了设计和优化,使其在长波红外(long-wavelength infrared, LWIR)具有优良的偏振性能。

2 理论研究方法

目前针对衍射光学元件的理论分析方法主要有标量衍射理论、矢量衍射理论和等效介质理论。其中,等效介质理论可分析含有金属结构的亚波长光栅偏振效应的成因。如图 1,可将光栅结构分成入射/反射区($z < 0$)、光栅区($0 < z < h$)和透射区($z > h$)三个区域,在光栅区光矢量两个正交偏振分量 TE 和 TM 具有不同的膜层特性。入射光使金属线栅中电子沿着刻槽方向自由振荡,由于自由电子与金属晶格中的原子发生碰撞,电矢量平行于光栅刻槽方向的 TE 波发生强烈的衰减和辐射,主要以反射形式出射;由于槽状介质的阻隔效应,线栅中的电子在垂直光栅刻槽方向上引发电流的能力减弱, TM 波没有明显的衰减和辐射,主要以透射形式出射。以上这两种出射形式的差异表明:TE 和 TM 偏振在光栅区分别具有金属膜和等效介质膜特性^[10,11],在光栅区可视为寻常光和非常光。由于 TE 和 TM 偏振的边界条件不同,根据等效折射率的零级近似展开,金属线栅对 TE 和 TM 光的等效折射率分别如式(1)、式(2)所示,其寻常折射率和非常折射率的差值远大于传统双折射材料,因此具有极为突出的形式

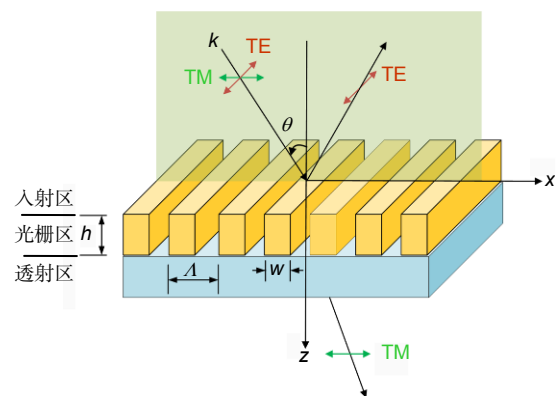


图 1 矩形面型光栅几何结构图。

Fig. 1 An illustration of the geometry for the rectangular-groove grating.

双折射效应。同时可知,这两种折射率受光栅占空比 f 及光栅区脊状、槽状介质折射率 n_{rd} 和 n_{gr} 的影响:

$$n_{\text{TE}} = \sqrt{fn_{\text{rd}}^2 + (1-f)n_{\text{gr}}^2}, \quad (1)$$

$$n_{\text{TM}} = \frac{1}{\sqrt{fn_{\text{rd}}^{-2} + (1-f)n_{\text{gr}}^{-2}}}. \quad (2)$$

由于亚波长光栅的特征尺寸在波长量级下,标量场的近似条件不再成立,必须把光波场视作矢量场才能精确求解。现有矢量衍射理论包括严格耦合波理论(RCWA)、时域有限差分法、有限元法、模态理论等。RCWA 涉及到的数学理论较为简单易于理解,近几十年来其稳定性、收敛性和计算效率等研究陆续得到完善,并被广泛使用。利用 RCWA 分析一维亚波长光栅,需要对光栅等厚分层并对每层电磁场做傅里叶(Fourier)展开,展开阶数在一定程度上影响计算结果的精度^[12],可由 Maxwell 方程组导出入射区和透射区电磁场表达式;对光栅区介电常数 Fourier 展开为式(3),推导出耦合波微分方程组,运用电磁场边界条件和矩阵分析法求解每一分层本征模式场的振幅系数和传播常数,进而确定光栅衍射效率^[13]。式(3)中光栅区相对介电常数的第 m 级 Fourier 分量由 ε_m 表示;式(4)为一维矩形光栅的 ε_m 表达式,占空比 f 是光栅线宽 w 与周期 A 的比值。

$$\varepsilon(x) = \sum_m \varepsilon_m \exp\left(j \frac{2\pi m}{A} x\right), \quad (3)$$

$$\varepsilon_m = \begin{cases} n_{\text{rd}}^2 f + n_{\text{gr}}^2 (1-f), & m=0 \\ (n_{\text{rd}}^2 - n_{\text{gr}}^2) \frac{\sin(\pi m f)}{\pi m}, & m \neq 0 \end{cases}. \quad (4)$$

3 亚波长光栅设计与优化

3.1 材料对偏振性能的影响

光栅基底材料影响衍射光栅的透射率。锗、硒化锌、氟化镁、氟化钡、氟化钙等都是常用的红外光学材料,综合考虑在 LWIR 波段透光的均匀性、耐潮解性、耐高温性、价格等因素,选择硒化锌(ZnSe)作为

设计光栅基底材料。Thorlabs 公司提供的 10 mm 厚 ZnSe 样本在 0.2 μm 到 25 μm 波段的透射率如图 2, ZnSe 在 LWIR 上的透过率达到 70%,具有足够宽的传输带。

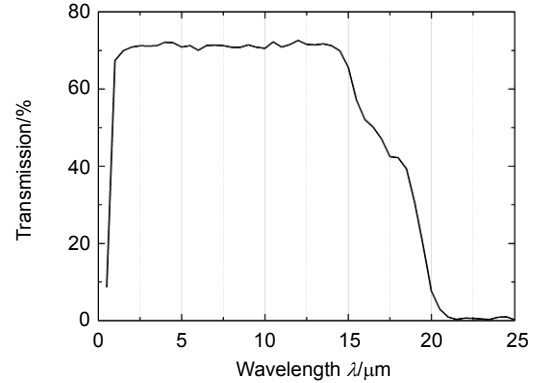


图 2 10 mm 厚 ZnSe 透光率。

Fig. 2 Transmission data measured through a 10 mm thick ZnSe substrate from Thorlabs.

图 3 给出了光栅结构的剖面形态,图 3(a)~3(c)分别代表金属层待刻蚀、完全刻蚀以及基底被过度刻蚀的情况。定义实际刻蚀深度 h ,金属层深度 h_2 ,被刻蚀的基底介质层深度 h_1 。如图 3(a),若金属层未被完全刻蚀($h < h_2$),残余金属层将阻止光线透射,各种偏振态的光线入射后均主要以反射形式出射。若在光栅制作中,由于刻蚀气体的速率或比例控制不当,基底很有可能也受到刻蚀($h > h_2$),在光栅区形成基底介质与金属复合的双层结构,如图 3(c)所示。

光栅区金属材质的选取会影响光栅的偏振性能。郭庆^[12]、康果果^[14]、张亮^[15]等在针对不同波段的光栅研究中发现铝金属的可靠性。本文为 LWIR 选择合适的金属材料,在 7 μm ~15 μm 的入射波段比较了铝、金、银、铜四种金属与 ZnSe 材料组合构成的双层光栅(周期 $A=1 \mu\text{m}$,占空比 $f=0.5$,被刻蚀 ZnSe 层深度 $h_1=0.4 \mu\text{m}$,金属层深度 $h_2=0.6 \mu\text{m}$,结构参数选取见 3.2 和 3.3 节的 TM 偏振光透过率(T_{TM} , TM transmission)和偏振消光比(ER , extinction ratio),计算公式:

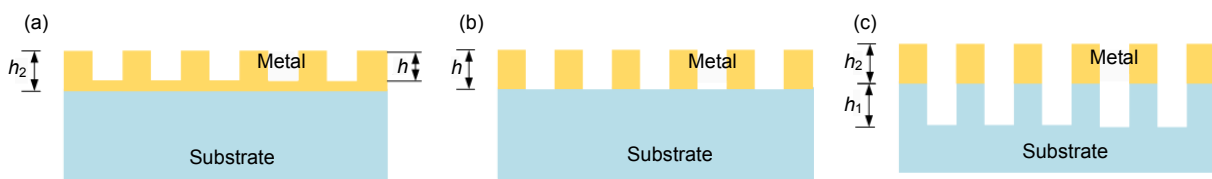


图 3 光栅结构剖面图。(a) 铝层不完全刻蚀。(b) 铝层完美刻蚀。(c) 硒化锌层过度刻蚀。

Fig. 3 Profile of the designed grating. (a) Incomplete etching of aluminum layer. (b) Fine etching of aluminum layer. (c) Excessive etching of zinc selenide layer.

$$ER = 10 \lg \left(\frac{T_{TM}}{T_{TE}} \right). \quad (5)$$

根据图 4 比较,光栅区金属材料为铝时,相比金、银、铜三种金属材料构成的光栅其 T_{TM} 稍显逊色但十分接近三者水平,而 ER 明显高于其他金属。金和银偏振效果相当,铜的消光性最差。因此,本文选用铝作为该光栅的金属材料进行设计。

3.2 周期和占空比对偏振性能的影响

亚波长光栅的周期在入射波长量级以下,进而保证了 0 级以外的高级次衍射波均为不携带能量的倏逝波^[16]。与入射波长接近的光栅周期范围称为共振区,在共振区光栅衍射易受光栅周期等参数的影响发生急剧变化,某级次衍射波从倏逝波或传播波突然相互转换,这是亚波长光栅衍射特性中的一个独特现象^[17],通常被称为瑞利反常或瑞利谐振,发生谐振处的波长:

$$\lambda = \frac{\Lambda(n_0 \sin \theta + n)}{k}, \quad (6)$$

式中: Λ 为光栅周期, θ 为发生谐振处的入射角, n_0 和 n 分别代表入射介质和基底介质中的折射率, k 是衍射级次。 $k=1$ 时式(6)所对应的波长即为 1 级衍射波能量存在或消失的临界波长。根据该式可以求解出入射波长和入射角一定时,瑞利反常的临界周期:

$$\Lambda = \frac{k\lambda}{n_0 \sin \theta + n}. \quad (7)$$

以 $\lambda=7 \mu\text{m}$ (LWIR 最短工作波长)的完全线偏振光(TM 偏振)正入射于矩形面型双层光栅($f=0.5$, 硒化锌层 $h_1=0.4 \mu\text{m}$, 铝层 $h_2=0.6 \mu\text{m}$)为例,硒化锌折射率 $n=2.42$,入射介质为空气,计算产生 1 级衍射的临界波长为 $2.89 \mu\text{m}$ 。利用光栅设计软件 GSlover 计算衍射效率并绘制曲线如图 5。当周期取值大于 $1.5 \mu\text{m}$ 时,0 级透射率随周期增大而明显降低。光栅在周期取 2.89

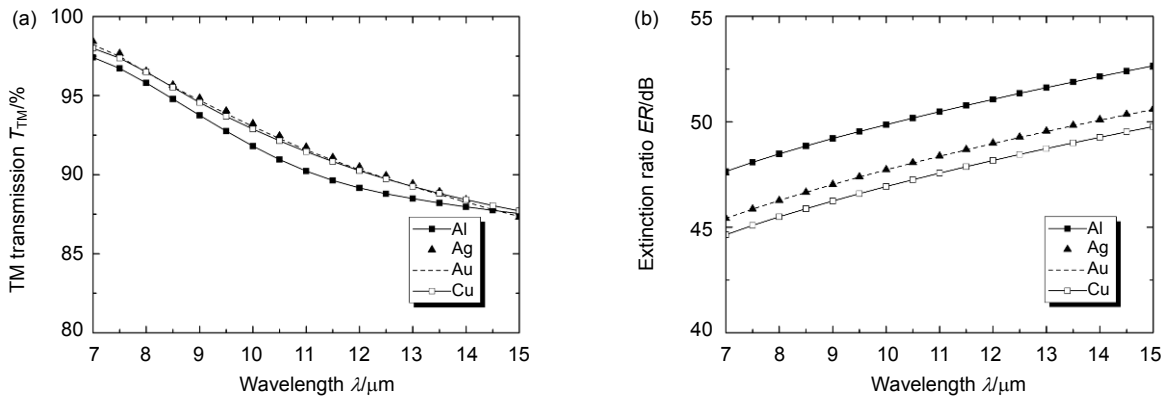


图 4 四种金属材料对偏振性能的影响。(a) 金属材料对 TM 透射率的影响。(b) 金属材料对消光比的影响。

Fig. 4 Influences on polarization performance from four different metal materials. (a) TM transmission results for various metal materials. (b) Extinction ratio results for various metal materials.

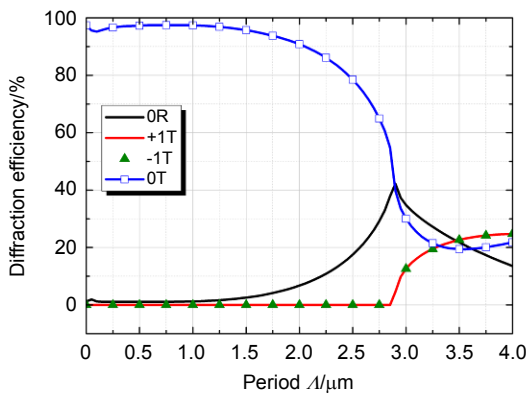


图 5 光栅临界周期仿真图。

Fig. 5 Critical period simulation diagrams.

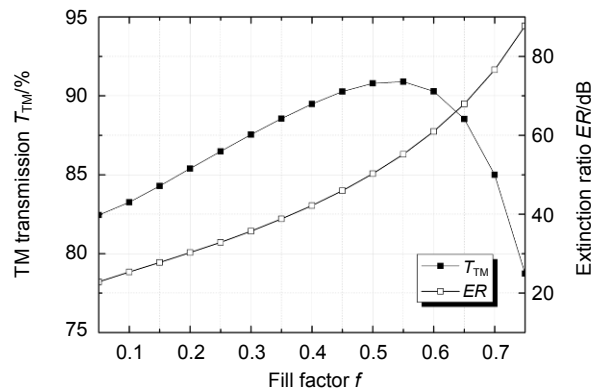


图 6 占空比对偏振性能的影响。

Fig. 6 Polarization performance versus fill factor.

μm 时产生 ± 1 级透射衍射,与式(7)计算结果吻合,该处0级反射效率达到最大值。为提高透射光栅偏振性能,需将光栅周期限定在小于临界周期值的范围内。

将波长 $10.6 \mu\text{m}$ 的光正入射本文设计的光栅($\Lambda=1 \mu\text{m}$, $h_1=0.4 \mu\text{m}$, $h_2=0.6 \mu\text{m}$),当调节占空比 f 在 $0.05\sim 0.75$ 区间变化时,对 T_{TM} 和 ER 的影响如图 6, ER 随占空比的增加而迅速提高; T_{TM} 在 f 取 $0.45\sim 0.6$ 之间时,透过率超过 90%;取 $f=0.5$,此时两种偏振性能均可达到较高水平。

3.3 栅槽深度对偏振性能的影响

光栅设计需要考虑制作工艺难度。深宽比或纵横比(aspect ratio)是指光栅槽深 h 与线宽 w 的比值,深宽比较大,会使加工难度系数上升,目前国内外研究者在设计 and 制作线栅时通常将深宽比控制在 2:1 甚至 1:1 之内。波长 $10.6 \mu\text{m}$ 的光正入射于铝/硒化锌双层光栅($\Lambda=1 \mu\text{m}$, $f=0.5$),综合图 7 可以发现, ER 随着铝层深度 h_2 的增加而显著提高,槽深 h_2 或 h_1 的增加对双层光栅 T_{TM} 的提高均具有正向作用。对于完美刻蚀的铝

栅($h=h_2$),见图 3(b)与图 7(a)中黑色曲线,铝层厚度的改变对 T_{TM} 几乎不产生任何影响,光栅消光性能的提高主要通过增大 h_2 来实现。通过表 1 比较发现, $h_1=0.9 \mu\text{m}$, $h_2=0.8 \mu\text{m}$ 时,偏振光栅能够达到最高 98.64% 的透射率且消光比高达 62 dB,但由于深宽比过大,理想面型难以实现,因此将总深度 h 控制在 $1 \mu\text{m}$ 以内,当 $h_1=0.4 \mu\text{m}$, $h_2=0.6 \mu\text{m}$ 时,能够达到 50 dB 的消光比和 90% 以上的 TM 透射率。

4 偏振性能分析

考虑到探测目标的多样性,要求偏振光栅具有较大有效入射范围和光谱宽度。将完美刻蚀的单层金属铝栅($h=1 \mu\text{m}$)、单层硒化锌光栅($h=1 \mu\text{m}$)与前文中设计的双层铝/硒化锌光栅($h_1=0.4 \mu\text{m}$, $h_2=0.6 \mu\text{m}$)在 $0\sim 60^\circ$ 的入射角范围内和 $7 \mu\text{m}\sim 15 \mu\text{m}$ 的入射波段内进行透光性能对比。三种光栅均为矩形面型,硒化锌基底,栅线占空比 0.5,周期 $1 \mu\text{m}$ 。由图 8 可见,以波长 $10.6 \mu\text{m}$ 的光入射,三种光栅 TM 透射率都会随入射角度的增大而提高,双层光栅 T_{TM} 始终处于 90% 以

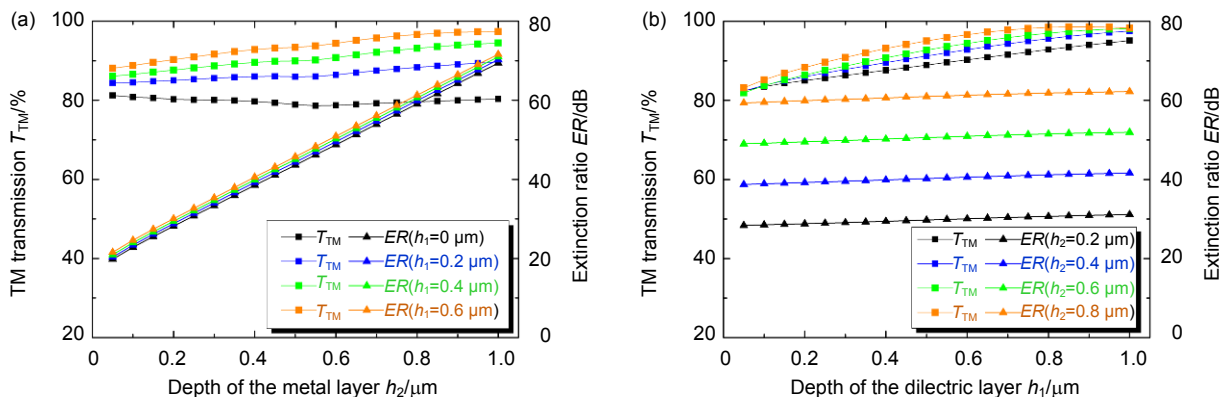


图 7 偏振性能与栅槽深度关系。(a) 铝层深度对双层光栅性能影响。(b) 硒化锌深度对双层光栅性能影响。

Fig. 7 Relationship of polarization performances and grating depths. (a) Results of varying aluminum depth on dual-layered grating. (b) Results of varying ZnSe depth on dual-layered grating.

表 1 不同槽深对偏振性能的影响结果。

Table 1 Results of polarization performances in different layer depths.

$h_1/\mu\text{m}$	$h_2/\mu\text{m}$	$T_{\text{TM}}/\%$	ER/dB	$h_1/\mu\text{m}$	$h_2/\mu\text{m}$	$T_{\text{TM}}/\%$	ER/dB
0.4	0.2	87.62	29	0.6	0.4	92.84	41
0.4	0.4	89.57	40	0.8	0.2	92.85	31
0.4	0.6	90.80	50	0.8	0.4	95.62	41
0.6	0.2	90.26	30	0.9	0.8	98.64	62

上,在小角度入射情况下与单层铝栅相比具有明显优势。如图9,光线正入射情况下,单层铝栅在整个 LWIR 上偏振性能较均匀, T_{TM} 约 80%; 双层光栅 T_{TM} 保持在 87%以上,经计算 ER 稳定在 47~53 dB 之间,短波长区域 TM 透射率极佳,在中心波长 10.6 μm 处 T_{TM} 高达 90.80%。

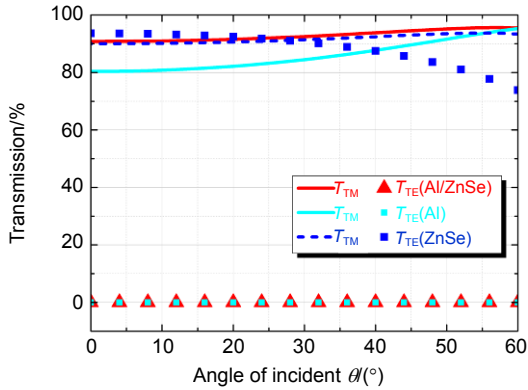


图8 入射角度对单层光栅与设计光栅透光性能影响。
Fig. 8 Transmission performances of monolayer gratings and designed grating with light incoming from varying angles .

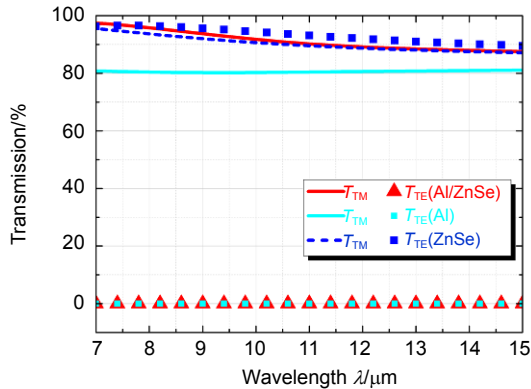


图9 单层光栅与设计光栅在 LWIR 透光性能比较。
Fig. 9 Comparison diagram of transmission performances between monolayer gratings and designed grating in the LWIR.

可以得出结论,光栅区的材料复合对偏振性能的影响主要体现在 TM 透过率的提高。这两种光栅具备一个共同特点,即在整体 LWIR 波段上 T_{TM} 和 T_{TE} 均基本保持稳定,入射角度的变化亦不能对其造成明显影响,对应的,二者的消光性能也基本稳定($ER > 47$ dB)。综合图8和图9可知,单层硒化锌光栅对 TE/TM 偏振分量的透射效果十分接近($T_{TM}/T_{TE} \approx 1:1$), ER 接近 0 dB,虽然透过率较高但却不能起到理想的消光效果。

图10显示了在 0~60°的入射范围内,铝/硒化锌双层光栅偏振器件在 LWIR 波段具有均匀、良好的偏振滤波效果,平均 T_{TM} 达到 87%以上,对正入射于光栅的 7 μm 波长线偏振光(TM 偏振)的透过率达到 97.42%。

通过表2将本设计与两种 LWIR 亚波长偏振光栅设计^[18,19]进行结构与偏振性能的对比。可知,本文中的铝/硒化锌双层光栅深宽比介于文献[18]与文献[19]光栅结构之间,在主透过率方面高于文献[19],相比文献[18]偏振性能具有明显提高。市面成品 LWIR 线栅偏振片消光比在 40 dB 左右,平均透过率能达到 75%,本文中提出的铝/硒化锌复合材料构成的双层光

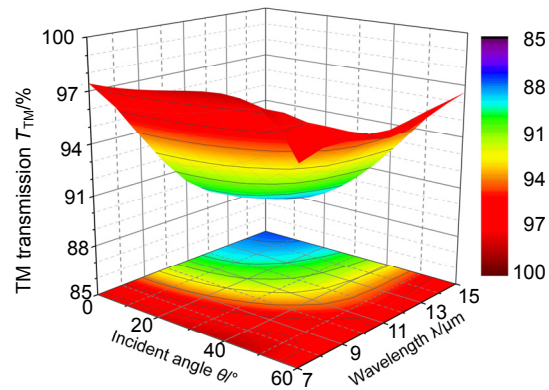


图10 铝/硒化锌双层光栅 TM 波透射衍射效率。
Fig. 10 TM transmission results of the designed bi-layered grating.

表2 不同光栅结构的线栅偏振器性能比较。

Table 2 Performances comparison of WGP with different structures.

Designs for WGP	Wave band/ μm	Period/ μm	Fill factor	Etched depth/ μm	$T_{TM}/\%$	ER/dB
Silver grating ^[18]	8~14	5	0.56	8	Over 30	34 ($\lambda=8 \mu\text{m}$); 13 ($\lambda=14 \mu\text{m}$)
Aluminum grating ^[19]	8~14	6~14	0.5	0.3	70~80	With no detailed data
Al/ZnSe grating	7~15	1	0.5	1	Over 87	49 ($\lambda=8 \mu\text{m}$); 52 ($\lambda=14 \mu\text{m}$)

栅能够从理论上将消光比提高到 100000:1, 并将宽波段的透过率大幅度提升至 87%以上, 符合系统的偏振成像需求。

5 结论

为提高适用于红外偏振成像系统的亚波长光栅的偏振性能, 本文通过分析光栅材料和结构参数对偏振性能的影响, 提出一种矩形面型的铝/硒化锌双层光栅结构。该光栅呈矩形形貌, 周期 1 μm , 光栅区金属铝深度 0.6 μm , 硒化锌深度 0.4 μm , 占空比 0.5。通过 GSlover 仿真发现, 长波红外线偏振光正入射该结构时其 TM 偏振透过率最高能达到 97.42%, 消光比达到 50 dB。除了有效带宽较宽, 该光栅偏振器还拥有较广的入射角范围: 当波长为 10.6 μm 的光线入射时, 在 0~60° 的入射范围内都能保证 90.80% 以上的 TM 透射率和 50 dB 以上的消光比。该双层光栅设计相比同参数单层亚波长铝金属光栅, 透偏振性具有明显提高。现有的镀膜、涂胶、Stepper 曝光、显影和离子束刻蚀(IBE)等技术为该双层光栅偏振器件的加工提供了实现条件, 文中的参量设计和性能分析对进一步的像素级微偏振片阵列的设计和制作具有一定的指导意义。

基金项目

国家自然科学基金(61475113)资助项目。

参考文献

- 1 Yemelyanov K M, Lin S S, Luis W Q, *et al.* Bio-inspired display of polarization information using selected visual cues[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2003, **5158**: 71–84.
- 2 Lin S S, Yemelyanov K M, Pugh E N, *et al.* Polarization enhanced visual surveillance techniques[C]// IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, 2004, **1**: 216–221.
- 3 Gartley M G. Polarimetric modeling of remotely sensed scenes in the thermal infrared[D]. Rochester: Rochester Institute of Technology, 2007.
- 4 Zhang Na, Chu Jinkui, Zhao Kaichun, *et al.* The design of the subwavelength wire-grid polarizers based on rigorous coupled-wave theory[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, **19**(5): 1739–1743.
张娜, 褚金奎, 赵开春, 等. 基于严格耦合波理论的亚波长金属光栅偏振器设计[J]. *传感技术学报*, 2006, **19**(5): 1739–1743.
- 5 Meng Fantao, Chu Jinkui, Han Zhitao, *et al.* Design of the sub-wavelength wire-grid polarizers[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2007, **5**(4): 269–272.
孟凡涛, 褚金奎, 韩志涛, 等. 亚波长金属光栅偏振器设计[J]. *纳米技术与精密工程*, 2007, **5**(4): 269–272.
- 6 Chen C M, Niu Peilun, Sung C K, *et al.* Fabricating bi-layered metallic wire-grid polarizers by nanoimprint and O₂ plasma etching[J]. *Microelectronic Engineering*, 2013, **102**: 53–59.
- 7 Zhou Yang. The research of deep-subwavelength grating by holographic-immersion lithography[D]. Suzhou: Soochow University, 2015.
周阳. 全息深亚波长光栅技术研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2015.
- 8 Liao Yanlin, Han Zhengfu, Cao Zhuoliang. Polarizer based on double layer subwavelength metal dielectric grating structure[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2005, **35**(5): 650–655.
廖艳林, 韩正甫, 曹卓良. 亚波长金属/电介质双层光栅偏振片[J]. *中国科学技术大学学报*, 2005, **35**(5): 650–655.
- 9 Li Yigui, Sugiyama S. Sub-wavelength gratings based on X-ray lithography[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2007, **5**(4): 249–252.
李以贵, 杉山进. 基于 X 光光刻的亚波长光栅[J]. *纳米技术与精密工程*, 2007, **5**(4): 249–252.
- 10 Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F, *et al.* Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. *Nature*, 1998, **391**(6668): 667–669.
- 11 Brundrett D L, Glytsis E N, Gaylord T K. Homogeneous layer models for high-spatial-frequency dielectric surface-relief gratings: conical diffraction and antireflection designs[J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(13): 2695–2706.
- 12 Guo Qing. The designing and fabrication process simulation of the wire-grid polarizer[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
郭庆. 金属光栅偏振器设计及其工艺仿真[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- 13 Moharam M G, Pommet D A, Grann E B, *et al.* Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, **12**(5): 1077–1086.
- 14 Kang Guoguo, Tan Qiaofeng, Chen Weili, *et al.* Design and fabrication of sub-wavelength metal wire-grid and its application to experimental study of polarimetric imaging[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(1): 337–343.
康果果, 谭峭峰, 陈伟力, 等. 亚波长金属线栅的设计、制备及偏振成像实验研究[J]. *物理学报*, 2011, **60**(1): 337–343.
- 15 Zhang Liang, Li Chengfang. Polarization effect of 150nm subwavelength aluminum wire grating in near infrared[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(4): 467–471.
张亮, 李承芳. 150 nm 亚波长铝光栅的近红外偏振特性[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 467–471.
- 16 Hasman E, Bomzon Z, Niv A, *et al.* Polarization beam-splitters and optical switches based on space-variant computer-generated subwavelength quasi-periodic structures[J]. *Optics Communications*, 2002, **209**(1-3): 45–54.
- 17 Zhou Chuanhong, Wang Lei, Nie Ya, *et al.* The rigorous coupled-wave analysis of guided-mode resonance in dielectric gratings[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(1): 68–73.
周传宏, 王磊, 聂娅, 等. 介质光栅导模共振耦合波分析[J]. *物理学报*, 2002, **51**(1): 68–73.
- 18 曾海芳. 红外偏振成像的关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- 19 卓丽霞. 亚波长金属光栅结构的红外特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.