

## 红外宽波段亚波长金属线栅偏振元件的研制

付秀华, 林晓敏\*, 张功, 王野, 张静

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 基于亚波长结构对光场的调控作用, 研制了单层金属线栅偏振元件。利用等效介质和严格耦合波分析(RCWA)理论确定了结构参数, 使用有限时域差分(FDTD)法优化设计了 Si 基底 Al 金属线栅结构, 并通过多层减反射膜与金属线栅结构的匹配, 降低了基底剩余反射率, 提高了横磁(TM)波透过率。采用间歇镀膜 Al 法减少了辐射温度导致的胶栅形变, 制备了具有高偏振性能的亚波长元件。经测试, 所制备的线栅偏振元件在中波红外 3~5  $\mu\text{m}$  波段的 TM 波透过率为 89.1%, 消光比为 21.9 dB。

**关键词** 薄膜; 减反射膜; 金属 Al; 间歇镀膜; 亚波长; 高偏振性能

**中图分类号** O484 **文献标志码** A

**doi:** 10.3788/CJL202148.0903002

## 1 引言

亚波长金属线栅偏振元件具有小体积、易集成、高性能的优点, 更符合器件微型化、集成化的发展趋势。金属线栅偏振元件可以透过横磁(TM)波, 反射横电(TE)波, 可有效识别物体发射的偏振光波, 在红外探测、液晶显示以及光通讯领域应用广泛<sup>[1-3]</sup>。

2009 年, 日本学者在 0.5~3 THz 波段, 利用湿法刻蚀的方法在 Si 基底上制备出周期  $p=3 \mu\text{m}$ , 高度  $h=300 \text{ nm}$ , 占空比  $f=0.5$  的金属铝线栅结构, 1 THz 时该结构的 TM 波透过率大于 95%, 消光比大于 45 dB<sup>[4]</sup>。

2014 年, 日本 Yamada 等<sup>[5]</sup>在 4~10  $\mu\text{m}$  波段, 利用双光束干涉与干法刻蚀法, 在 Si 基底上制备了  $p=400 \text{ nm}$ ,  $h=260 \text{ nm}$ ,  $f=0.5$  的光栅结构, 当入射角为 40°时, 该结构的 TM 透过率大于 60%, 消光比最大值为 22.2 dB。

2013 年, 哈尔滨工业大学在 1~10 THz 频段设计并制备了 SiO<sub>2</sub> 基底上的  $p=2 \mu\text{m}$  的金属 Al 线栅结构, 其中  $h=2 \mu\text{m}$ ,  $f=0.4$ , 测得 TM 波透过率最大值为 82%, 消光比为 62 dB<sup>[6]</sup>。

2018 年, 中国科学院上海技术物理研究所在 3~5  $\mu\text{m}$  波段在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基底上制备了  $p=400 \text{ nm}$ ,  $h=100 \text{ nm}$ ,  $f=0.5$  的单层金属线栅结构, 通过引入单层低折射率材料 MgF<sub>2</sub>, 降低了基底表面的剩余反射率, 测得 TM 波透过率为 83.3%, 消光比为 10 dB<sup>[7]</sup>。

TM 波透过率与消光比是评价金属线栅偏振元件性能的重要指标。目前, 国内外公开报道的金属线栅偏振元件无法同时满足高 TM 波透过率与高消光比的性能要求, 需要进一步对元件的结构设计和制备技术进行研究。金属线栅元件可采用单层金属线栅或双层金属线栅结构<sup>[8]</sup>。单层金属线栅具有较高的 TM 波透过率, 但消光比受周期、占空比和高度等参数的影响; 双层金属线栅结构的元件虽然有较高的消光比, 但双层金属结构抑制了 TM 波透过率。因此, 本文针对单层金属线栅结构, 研究了金属线栅结构设计以及偏振元件的制备工艺, 以同时提高 TM 波的透过率及消光比。

## 2 金属线栅结构设计

## 2.1 金属线栅结构参数的理论计算

根据严格耦合波分析(RCWA)理论<sup>[9]</sup>, 得到亚

收稿日期: 2020-10-10; 修回日期: 2020-10-27; 录用日期: 2020-11-11

基金项目: “十三五”装备预研基金项目(41423XXXX02)

\* E-mail: 15754314037@163.com

波长元件的衍射周期:

$$p = \frac{\lambda \times m}{n + \sin \theta}, \quad (1)$$

式中:  $p$  为结构周期;  $\theta$  为入射角;  $m$  为衍射级次;  $n$  为基底折射率;  $\lambda$  为入射波长。应用亚波长元件时, 只希望零级衍射光透过, 因此衍射周期最大不可超过  $m=1$  时的周期。当光垂直入射无减反射膜的 Si 基底 ( $n=3.4$ ) 时, 在  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  波段发生  $m=1$  级衍射时的周期为  $882\ \text{nm}$ , 因此本文所设计的结构周期  $p < 882\ \text{nm}$ 。

根据等效介质理论<sup>[10]</sup>, 推导出 TE 波与 TM 波的零阶等效折射率分别为

$$n_{\text{TE}}^{(0)} \approx n_1 \sqrt{f}, \quad (2)$$

$$n_{\text{TM}}^{(0)} \approx \frac{n_r}{\sqrt{1-f}}, \quad (3)$$

式中:  $n_1$  为金属材料的折射率;  $n_r$  为线栅间隙介质的折射率。假设  $f=0.5$ ,  $n_{\text{TE}}^{(0)}$  的值与  $n_1$  有关,  $n_{\text{TM}}^{(0)}$  与凹槽内  $n_r$  有关, 根据文献[11]确定各金属材料的折射率与消光系数, 其数值如表 1 所示。通过对比发现, 在各金属中, Al 的  $n_{\text{TE}}^{(0)}$  最大, Al 具有较好的偏振性, 适合作为线栅的膜层材料。

表 1 各金属在  $4\ \mu\text{m}$  处的折射率、消光系数、 $n_{\text{TE}}^{(0)}$  和  $n_{\text{TM}}^{(0)}$   
Table 1 Refractive index, extinction coefficient,  $n_{\text{TE}}^{(0)}$  and  $n_{\text{TM}}^{(0)}$  of each metal at  $4\ \mu\text{m}$

Parameter	Al	Ag	Au	Cr
Refractive index	6.1	1.89	2.6	3.15
Extinction coefficient	30.0	28.7	24.6	14.3
$n_{\text{TE}}^{(0)}$	4.3	1.34	1.83	2.27
$n_{\text{TM}}^{(0)}$	1.41	1.41	1.41	1.41

## 2.2 金属线栅结构的设计

为了提高元件的偏振性能, 需要对金属线栅结构参数以及基底的剩余反射率进行优化。

影响金属线栅偏振元件性能的参数有周期、占空比和线栅高度。随着结构周期的减小, 光入射在相同面积上时, TE 波在平行线栅方向与更多自由电子发生耦合共振, 碰撞频率提高, 损耗增加, 从而降低了透过率。而随着间隙的缩小, TM 波自由电子的振荡空间也减小, 损耗降低, 从而提高了透过率。受制备条件的制约, 本文仅对周期为  $300\ \text{nm}$  的金属线栅结构进行了研究。

利用 FDTD 软件模拟基底上  $p=300\ \text{nm}$  时, 占空比与高度对 TM 波透过率与消光比 (ER) ER 的影响, 结果如图 1、2 所示。

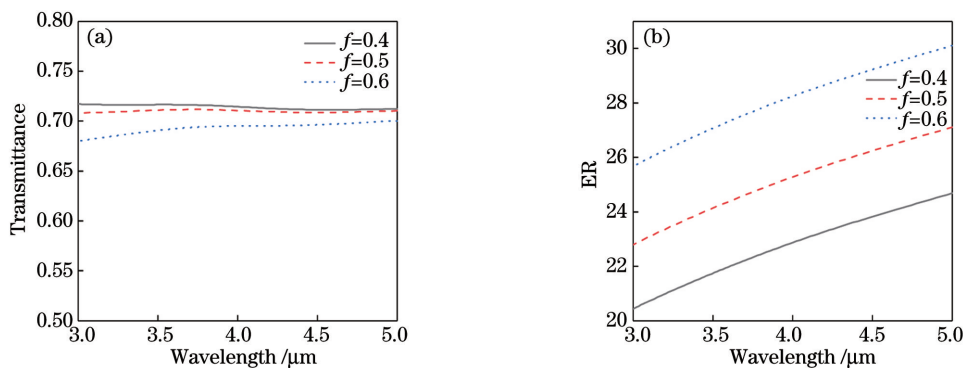


图 1 不同占空比时的模拟曲线。(a) TM 波透过率; (b) ER

Fig. 1 Simulation curves under different duty cycles. (a) TM wave transmittance; (b) ER

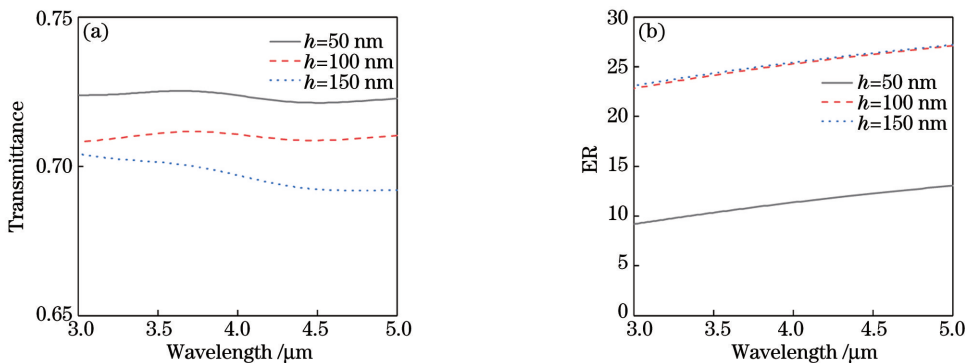


图 2 不同高度时的模拟曲线。(a) TM 波透过率; (b) ER

Fig. 2 Simulation curves under different heights. (a) TM wave transmittance; (b) ER

当参数变化时, TM 波的透过率与 ER 相互制约, 无法同时达到最优值。最终结构参数确定为  $p=300\text{ nm}$ ,  $f=0.5$ ,  $h=100\text{ nm}$ , 此时元件具有较高的 TM 波透过率与较大的 ER。经计算, TM 波的透过率为 70.19%, 消光比为 26.8 dB, 其中基底的剩余反射率对元件偏振性能也有较大影响。

在  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  波段, 常用材料 Si 作为基底, 选择 Si 与 SiO 作为高、低折射率材料。利用膜系设计理论与单纯型优化方法, 中心波长为  $4\ \mu\text{m}$ , 优化后的膜系为 Sub|0.138L0.501H1.017L|Air 的减反射膜, 其中 H 代表高折射率材料, L 代表低折射率材料。将镀有多层减反射膜的金属线栅结构与镀有单层 SiO 减反射膜的金属线栅结构进行对比, 分析基

底剩余反射率对元件偏振性能的影响。当 Si 基底镀有单层 SiO 膜时, 其平均剩余反射率为 3.12%; 当 Si 基底镀有多层减反射膜时, 平均剩余反射率为 0.5%。

光入射在 Si 基底与金属 Al 线栅交界面时, 会产生表面等离子激元(SPP)效应<sup>[12]</sup>, 共振波长为

$$\lambda_{\text{spp}} = \lambda \sqrt{\frac{\epsilon_d + \epsilon_m}{\epsilon_d \epsilon_m}}, \quad (4)$$

式中:  $\epsilon_m$  为金属介电常数;  $\epsilon_d$  为介质介电常数;  $\lambda_{\text{spp}}$  为激发 SPP 的共振波长, 经过计算,  $\lambda_{\text{spp}} = 1.2\ \mu\text{m}$ 。在模拟引入减反射膜前后, 波长为  $1.2\ \mu\text{m}$  的 TM 波经过交界面时的电场能量分布如图 3 所示。经过分析可知, 引入减反射膜可以降低交界面处的 SPP 效应, 使电磁振荡主要分布在线栅的凹槽内。

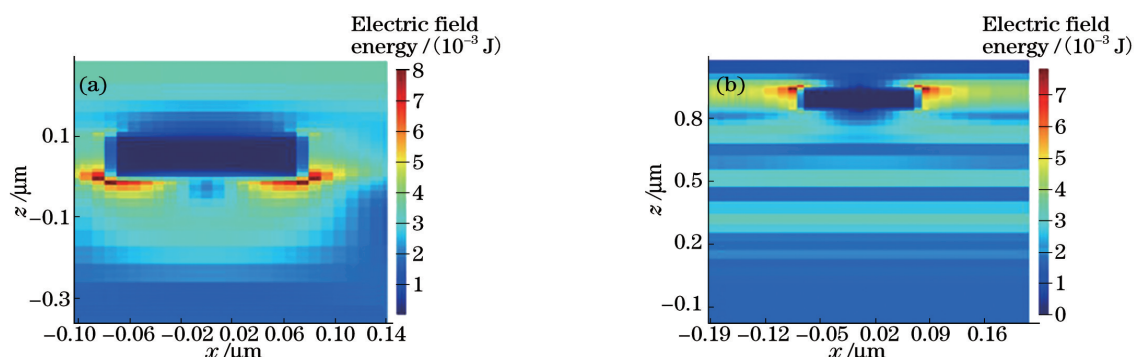


图 3 引入减反射膜前后横截面的电场能量分布。(a)前;(b)后

Fig. 3 Cross-sectional energy distributions before and after introduction of antireflection coating. (a) Before; (b) after

采用 FDTD 软件模拟  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  波段基底上未镀膜、镀制单层介质膜与镀制多层减反射膜时金属线栅偏振元件的 TM 波透过率与 ER, 结果如图 4 所示。通过计算, 得到 TM 波的平均透过率分别为 70.19%、90% 和 95.4%, TE 波的平均透过率分别为 0.151%、0.056% 和 0.051%, 消光比平均值为 26.8 dB、32.2 dB 和 32.8 dB。根据等效介质理论可知, 金属线栅结构相对于 TE 波可视为一层金属

膜。当 Si 基底上不镀制减反射膜时, 金属膜与 Si 基底相当于谐振腔, TE 波在上下表面发生多次反射, TE 波的能量增强。当在 Si 基底上镀制介质膜后, 等效折射率接近于空气的折射率, TE 波可以直接出射。减反射效果越好, 谐振效应越弱, 因此镀制多层减反射膜后, TE 波的透过率降低。经过对比可知, 对于镀制多层减反射膜的偏振元件, 其 TM 波透过率与消光比均大于镀制单层减反射膜的偏振元件。

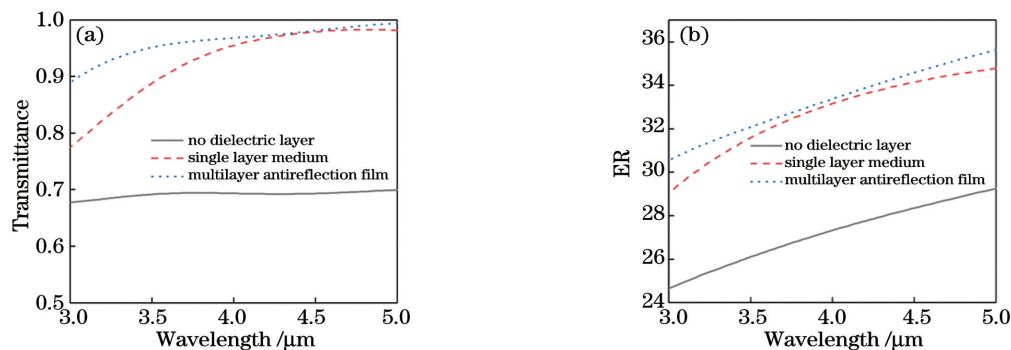


图 4 不同偏振元件的模拟曲线。(a) TM 波透过率;(b) ER

Fig. 4 Simulation curves of different polarization elements. (a) TM wave transmittance; (b) ER

### 3 金属线栅偏振元件的制备

#### 3.1 减反射膜的制备

在减反膜的制备过程中,沉积 SiO 材料时,选择工艺不当会在表面形成过多缺陷,从而导致线栅形状发生改变,增加去胶难度。图 5 为沉积速率不同时 SiO 薄膜表面的显微镜图。经过对比发现,当

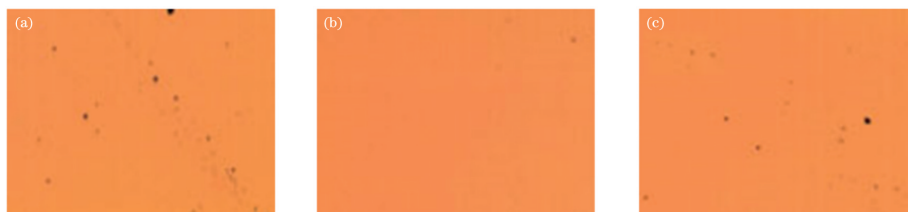


图 5 不同沉积速率下的薄膜表面形貌。(a)0.3 nm/s;(b)0.5 nm/s;(c)0.7 nm/s

Fig. 5 Surface morphologies of films under different deposition rates. (a) 0.3 nm/s; (b) 0.5 nm/s; (c) 0.7 nm/s

优化后的薄膜沉积工艺参数如表 2 所示,当本底真空度达到  $3.0 \times 10^{-3}$  Pa 时开始蒸镀,沉积 Si 膜时真空室不充气;沉积 SiO 材料时向真空室充入  $O_2$ ,将真空度维持在  $1.1 \times 10^{-2}$  Pa,可获得折射率较低的 SiO 材料,提高减反射效果。

表 2 薄膜沉积工艺参数

Table 2 Process parameters for film deposition

Material	Baking temperature / $^{\circ}C$	Deposition vacuum /Pa	Deposition rate / $(nm \cdot s^{-1})$
Si	280	$3.0 \times 10^{-3}$	0.3
SiO	280	$1.1 \times 10^{-2}$	0.5

#### 3.2 金属线栅结构的制备

本文采用 lift-off 法<sup>[15]</sup>去胶,光刻胶的厚度对金属线栅剥离程度的影响需要通过实验来验证。取适量光刻胶滴在镀有减反射膜的 Si 基底上,将匀胶机的转速分别设定为 3000,4000,5000 r/min,工作时间为 40 s;之后使用台阶仪测量光刻胶厚度,分别为 285,213,126 nm;然后使用波长为 325 nm 的双光

束干涉仪对光刻胶进行曝光,时间分别为 180,120,65 s;最后经过 17,12,8 s 的显影,得到  $p = 300$  nm,  $f = 0.5$ ,  $h = 285, 213, 126$  nm 的胶栅结构。

镀制 100 nm 厚的金属 Al 后,使用质量分数为 98% 的丙酮溶液浸泡结构约 8 min,利用显微镜观察线栅结构,如图 6 所示。对比发现,当光刻胶厚度为 126 nm 时,线条模糊,胶层未成功剥离,如图 6(a)所示。这是因为蒸发粒子进入凹槽时与侧壁碰撞,发生反射,线栅顶部与凹槽的金属相互连接,形为具有线栅结构的 Al 膜。当光刻胶厚度为 285 nm 时,线条仅存在少数,大部分脱落,如图 6(c)所示。这是由于线栅深宽比过高,部分蒸发粒子在碰撞与反射作用下无法进入凹槽,因此剥离时结构脱落。当光刻胶厚度为 213 nm 时,线条结构清晰,如图 6(b)所示。金属粒子在胶栅上与凹槽底部均匀沉积,线栅顶部与凹槽底部的薄膜之间形成断面,丙酮溶液通过缝隙将光刻胶溶解。所以本文选择 4000 r/min 作为匀胶机的转速。

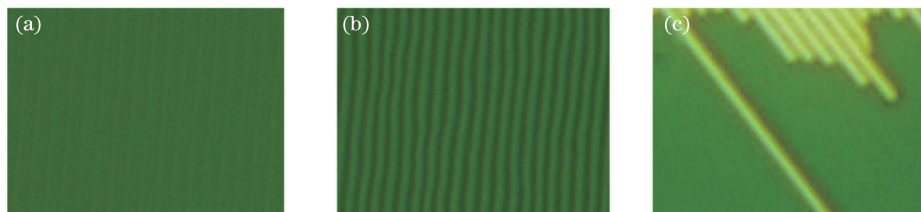


图 6 不同光刻胶厚度下去胶后结构的显微镜图。(a)126 nm;(b)213 nm;(c)285 nm

Fig. 6 Micrographs of structure after degumming under different photoresist thicknesses. (a) 126 nm; (b) 213 nm; (c) 285 nm

由图 6(b)发现,金属线栅之间并不是理想的平行状态。分析原因是当电子束通过加热的方式将金属材料蒸发时,由于沉积时间较长,基底上积累的热

量过多,导致温度升高,从而光刻胶线栅形状发生改变,剥离后的金属线栅形状也随之改变。本文采用间歇镀 Al 膜的方法,将 100 nm 厚度的 Al 分 4 次

蒸镀,每沉积 25 nm 左右厚度时,维持真空度 10 min 以使基底冷却,这种方式可以有效降低电子辐射对光刻胶线栅的影响。图 7 为使用间歇镀膜方法制备的金属 Al 线栅结构,可以观察到形状有所改善。

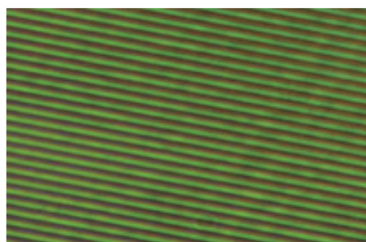


图 7 使用间歇镀膜法镀制的金属 Al 线栅结构  
Fig. 7 Metal Al wire grid structure fabricated by intermittent coating method

## 4 测试与分析

### 4.1 形貌测试

图 8 为截面与表面的扫描电镜(SEM)图,可以观测到线栅具有良好的周期性,线宽与缝宽的比为 1:1,测得金属 Al 高度为 95 nm,周期为 304 nm。

### 4.2 光谱测试

采用带起偏器的红外傅里叶光谱仪测试 3~

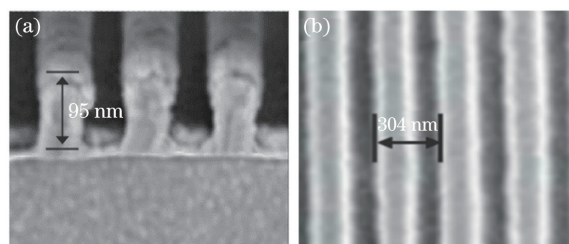


图 8 扫描电镜图。(a)截面;(b)表面

Fig. 8 SEM images. (a) Cross section (b) surface

5  $\mu\text{m}$  波段 TM 波与 TE 波的透过率,并计算其消光比,如图 9 所示。

经过测试,平均 TM 波透过率为 89.1%,平均 TE 波透过率为 0.6%,ER 为 21.7 dB, TM 波透过率与 ER 都低于理论值。分析产生误差的原因,主要有两点。其一是金属 Al 在空气中发生氧化,形成  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜覆盖金属 Al 线栅表面。其二是如图 8(a)所示,光刻胶壁对蒸发粒子有反射作用,从而影响线栅垂直度,使其线宽不相同。当 Al 线栅上表面宽度为 150 nm,下表面宽度 130 nm,表面附有 5 nm 厚度的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜时,反演模拟的 TM 波透过率与 ER 如图 10 所示。经过计算可得,平均 TM 波透过率为 91.23%,平均 ER 为 25.1 dB,模拟曲线与测试曲线的趋势基本相同。

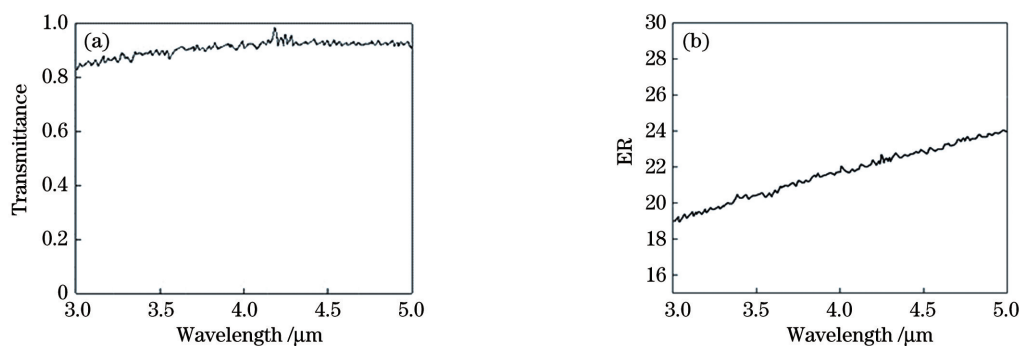


图 9 光谱测试曲线图。(a) TM 波透过率;(b) ER

Fig. 9 Spectral test curves. (a) TM wave transmittance; (b) ER

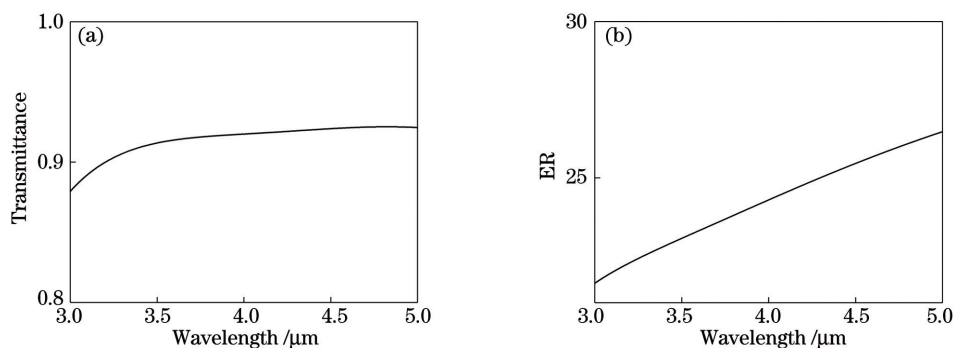


图 10 反演模拟曲线图。(a) TM 波透过率;(b) ER

Fig. 10 Inversion simulation curves. (a) TM wave transmittance; (b) ER

## 5 结 论

为了提高中红外偏振探测系统的性能,以 Si 为基底,采用真空镀膜与全息光刻技术相结合的方法,设计并制备了亚波长金属线栅偏振元件。利用等效介质与严格耦合波理论,推导了元件的结构参数,并使用 FDTD 软件模拟了各参数对 TM 波透过率与消光比的影响。通过实验优化了光刻胶的厚度,采用间歇镀 Al 膜法,降低了辐射温度对线栅结构的影响。经过测试,制备的偏振元件在 3~5  $\mu\text{m}$  波段的平均 TM 波透过率为 89.1%,平均 ER 为 21.9 dB。提高金属线栅结构垂直度与防止金属氧化的方法有待进一步研究。

### 参 考 文 献

- [1] Chen Y, Zhou X D, Zhou J, et al. Fano-resonance sensing mechanism of sub-wavelength dielectric grating-metal Ag thin film-periodic photonic crystal hybrid structure [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0413001.  
陈颖, 周鑫德, 周健, 等. 亚波长介质光栅-金属 Ag 薄膜-周期性光子晶体混合结构的 Fano 共振传感机理[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0413001.
- [2] Cai E F. Design and analysis of optical-communication-band sub-wavelength grating polarizer [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013: 410-416.  
蔡二飞. 光通信波段亚波长光栅偏振器的设计与分析[D]. 北京: 北京邮电大学, 2013: 410-416.
- [3] Shen C, Wei S, Yu H X, et al. Model of liquid crystal on silicon device with sub-wavelength grating structure [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(3): 0305001.  
沈川, 韦穗, 虞海秀, 等. 基于亚波长光栅结构的硅基液晶器件模型研究[J]. 光学学报, 2020, 40(3): 0305001.
- [4] Yamada I, Takano K, Hangyo M, et al. Terahertz wire-grid polarizers with micrometer-pitch Al gratings [J]. Optics Letters, 2009, 34(3): 274-276.
- [5] Yamada I, Nishii J, Saito M, et al. Incident angle and temperature dependence of WSi wire-grid polarizer [J]. Infrared Physics & Technology, 2014, 63: 92-96.
- [6] Mao Z J. The polarization properties and slow-light effects of subwavelength metallic gratings in terahertz region [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 26-28.  
毛祖金. THz 波段亚波长金属光栅的偏振特性和慢光效应研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 26-28.
- [7] Kong Y Y. Research on the structure and characteristic of mid-infrared metallic wire-grid polarizer [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018: 81-83.  
孔园园. 中波红外金属线栅偏振器的结构设计与特性研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2018: 81-83.
- [8] Ekinci Y, Solak H H, David C, et al. Bilayer Al wire-grids as broadband and high-performance polarizers [J]. Optics Express, 2006, 14(6): 2323-2334.
- [9] Meng F T, Chu J K, Han Z T, et al. The design of the sub-wavelength wire-grid polarizer [C] // 2007 7th IEEE Conference on Nanotechnology (IEEE NANO), August 2-5, 2007, Hong Kong, China. New York: IEEE Press, 2007: 942-946.
- [10] Wang W M, Ruan D S, Jing X F, et al. Analysis of accuracy of scalar diffraction theory and effective medium theory for sinusoidal grating [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(7): 70705001.  
王卫敏, 阮东升, 井绪峰, 等. 正弦光栅标量衍射及等效介质理论有效性分析 [J]. 光子学报, 2016, 45(7): 70705001.
- [11] Palik E D. Handbook of Optical Constants of Solids [M]. Pittsburgh: Academic Press, 1997: 709-723.
- [12] Liu J, Liu J, Wang Y T, et al. Resonant properties of sub-wavelength metallic gratings [J]. Chinese Journal of Optics, 2011, 4(4): 363-368.  
刘镜, 刘娟, 王涌天, 等. 亚波长金属光栅的表面等离子体激元共振特性 [J]. 中国光学, 2011, 4(4): 363-368.
- [13] Zhao J L, He H B, Wang H, et al. Influence of deposition rate on microstructure and optical properties of Mo films fabricated by direct current pulse sputtering [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0931001.  
赵娇玲, 贺洪波, 王虎, 等. 沉积速率对直流脉冲溅射钼薄膜微结构与光学性能的影响 [J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0931001.
- [14] Fu X H, Zhang G, Zhang J, et al. Short-medium infrared detection system broadband high transmittance film [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(10): 1017001.  
付秀华, 张功, 张静, 等. 短中波红外探测系统宽波段高透过率薄膜 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(10): 1017001.
- [15] Gong C Y, Fan J, Zou Y G, et al. Fabrication of holographic lithography micro-nano gratings using metal mask [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46

(12): 1203001.

刻微纳光栅制备工艺[J]. 中国激光, 2019, 46(12):

龚春阳, 范杰, 邹永刚, 等. 基于金属掩模的全息光

1203001.

## Development of Infrared Wide Band Polarizing Elements with Subwavelength Metal Wire Grids

Fu Xiuhua, Lin Xiaomin\*, Zhang Gong, Wang Ye, Zhang Jing

*School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*

### Abstract

**Objective** This study introduces a new type of metal wire grid polarization element with high transmittance for transverse magnetic (TM) waves and a high extinction ratio. This polarization element has the ability to transmit incident light TM waves and to achieve the polarization effect of transverse electric (TE) wave reflection, which indicates an important application in stealth recognition and feature detection. Commonly used metal wire grid elements can be manufactured with single- or double-layer metal wire grid structures. The single-layer wire grid has high TM wave transmittance, although the extinction ratio is affected by the period, duty cycle, height, and other parameters. Although the double-layer metal wire grid structure has a higher extinction ratio, it suppresses the transmission of TM waves and causes a sharp drop in transmittance. In 2014, TM wave transmittance of more than 60% and the maximum extinction ratio of 22.2 dB were realized in a single-layer metal wire grid polarizer produced in Japan. In 2018, a single-layer metal wire grid polarization element manufactured by Shanghai Institute of Technical Physics of Chinese Academy of Sciences achieved TM wave transmittance of 83.3% and an extinction ratio of 10 dB. Presently, metal wire grid polarization elements reported at home and abroad cannot simultaneously meet the performance requirements of high TM wave transmittance and a high extinction ratio. Therefore, it is necessary to further study the structural design and preparation technology of these elements. In this study, a single-layer metal wire grid structure in the mid-infrared 3–5  $\mu\text{m}$  band is developed, and the design and the preparation process of a polarization element are studied to improve the TM wave transmittance and the extinction ratio.

**Methods** Effective medium theory (EMT) and rigorous coupled wave analysis (RCWA) were used to design the metal wire grid structure. According to the design theory of optical thin films, a multilayer anti-reflection film was designed to reduce the residual anti-reflection rate of the Si substrate and to further increase the transmittance of the TM waves. The finite difference time domain (FDTD) method was used to simulate the TM wave transmittance and the extinction ratio of the new grating structure. The polarization component structure was manufactured by electron beam evaporation and interference lithography. The surface quality of the film was improved by optimizing the deposition process of thin film materials, and the intermittent coating method was used to prepare the high-performance metal wire grid polarization element and to reduce the radiation temperature of the photoresist. The results were tested by the Fourier-transform infrared spectrometry and the finite difference time domain method.

**Results and Discussions** A new type of polarization element structure is designed by combining a multilayer anti-reflection film with a metal wire grid to solve the requirements of high TM wave transmittance and high extinction ratios of a polarization element. In the mid-infrared 3–5  $\mu\text{m}$  band, the average TM wave transmittance is 89.1% and the average extinction ratio is 21.9 dB. According to the design theory of optical film, the oxygen partial pressure is optimized during the SiO film deposition. At the center wavelength of 4  $\mu\text{m}$ , the refractive index is 1.64, which reduces the refractive index of the SiO and improves the transmittance of the multilayer anti-reflection film. By changing the speed of the homogenizer to manufacture photoresists with different thicknesses and using the lift-off method to strip the metal wire grid, the thickness of the photoresist that can be completely stripped is determined. When using the intermittent coating method to vaporize metal Al with a certain thickness for several times at an interval of 10 min, the photoresist deformation and the shape error of the photoresist grid caused by radiant heat are both reduced, and the polarization performance of the manufactured metal wire grid element is improved.

**Conclusions** A new type of polarization element is designed by combining a multilayer optical anti-reflection film

with a metal wire grid, which reduces the residual reflectivity of the substrate and improves the transmittance of TM waves. The application of this film reduces the resonance effect between the substrate and the metal film. Thus, the energy enhancement caused by multiple reflection of TE waves is reduced, resulting in reduced transmittance of TE waves and an improved the extinction ratio. According to the experiment results, the influence of radiant heat from film deposition on the deformation of the photoresist during the preparation process is analyzed, and the deposition process parameters of the film are optimized. The preparation accuracy is improved, and a new type of metal wire grid polarization element is developed. After testing, the average TM wave transmittance and the average extinction ratio of the manufactured polarization device is 89.1% and 21.9 dB in the 3–5  $\mu\text{m}$  band, respectively.

**Key words** thin films; antireflection film; metal Al; intermittent coating; sub-wavelength; high polarization performance

**OCIS codes** 310.1210; 310.3915; 310.6628; 310.3840