

## 中波红外亚波长单层增透膜金属线栅偏振器件设计

王佩瑶 刘涇庚 任立勇

### Design of mid-wave infrared metal wire-grid polarizer with sub-wavelength single-layer antireflection film

WANG Peiyao, LIU Huangeng, REN Liyong

引用本文:

王佩瑶, 刘涇庚, 任立勇. 中波红外亚波长单层增透膜金属线栅偏振器件设计[J]. 应用光学, 2025, 46(1): 186–193. DOI: 10.5768/JAO202546.0105004

WANG Peiyao, LIU Huangeng, REN Liyong. Design of mid-wave infrared metal wire-grid polarizer with sub-wavelength single-layer antireflection film[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(1): 186–193. DOI: 10.5768/JAO202546.0105004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0105004>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 亚波长光栅偏振片的纳秒脉冲激光损伤特性

Nanosecond pulse laser damage characteristics of sub-wavelength gratings polarizers

应用光学. 2019, 40(1): 138–142 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0107002>

#### 基于多变量纳米线栅复合结构的可见光偏振调控

Polarization control of visible light based on composited multivariable nanowire gratings structure

应用光学. 2024, 45(4): 700–708 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0401005>

#### 基于双层金属光栅的中波红外多通道滤光片结构

Multi-channel mid-infrared filter structure based on bilayer metallic grating

应用光学. 2020, 41(1): 176–179 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0106001>

#### 纳秒脉冲激光对金属丝电爆炸过程的瞬态测量方法研究

Transient measurement on electric explosion of metal wire by nanosecond pulsed laser

应用光学. 2019, 40(6): 1109–1114 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0603005>

#### 一种基于偏振相机的应力测量方法及其误差校正

Stress measurement method and error correction based on polarization camera

应用光学. 2024, 45(6): 1212–1218 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0603001>

#### 基于光子集成芯片的可穿戴光纤光栅解调研究

Wearable fiber grating demodulation based on photonic integrated chip

应用光学. 2023, 44(1): 219–225 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0108001>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 01-0186-08

引用格式: 王佩瑶, 刘涇庚, 任立勇. 中波红外亚波长单层增透膜金属线栅偏振器件设计 [J]. 应用光学, 2025, 46(1): 186-193.

WANG Peiyao, LIU Huangeng, REN Liyong. Design of mid-wave infrared metal wire-grid polarizer with sub-wavelength single-layer antireflection film[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(1): 186-193.



在线阅读

# 中波红外亚波长单层增透膜金属线栅偏振器件设计

王佩瑶<sup>1,2</sup>, 刘涇庚<sup>1,2</sup>, 任立勇<sup>1,2</sup>

(1. 陕西师范大学 物理学与信息技术学院, 陕西 西安 710119; 2. 西安市光信息调控与增强技术重点实验室, 陕西 西安 710119)

**摘要:** 针对  $3\ \mu\text{m} \sim 5\ \mu\text{m}$  中波红外波段, 设计了一种硅 (Si) 基底上的金 (Au) 金属线栅偏振器件, 提出了在 Au 线栅和 Si 基底间引入  $\text{MgF}_2$  介质层, 以提高金属线栅的 TM 波透过率和偏振消光比 ER。利用 COMSOL 仿真软件模拟优化 Si 基底上的 Au 金属线栅的相关结构参数, 计算结果表明, TM 波平均透过率为 93%、平均偏振消光比为 39.3 dB。同时, 还提出了采用金属钨 (W) 作为新的金属材料来提高线栅偏振器偏振性能的方法, 仿真结果表明, TM 波平均透过率为 92.7%、平均偏振消光比为 64.4 dB。然而, 金属钨的硬度较高, 对蚀刻工艺要求更高, 我们期待通过工艺和技术手段的进步, 制作出性能优越的中波红外金属线栅偏振器件。

**关键词:** 金属线栅偏振器; Si 基底; 金 (Au) 线栅; 钨 (W) 线栅; 偏振消光比

中图分类号: O43

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0105004

## Design of mid-wave infrared metal wire-grid polarizer with sub-wavelength single-layer antireflection film

WANG Peiyao<sup>1,2</sup>, LIU Huangeng<sup>1,2</sup>, REN Liyong<sup>1,2</sup>

(1. School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 2. Key Laboratory of Optical Information Regulation and Enhancement Technology, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** A Si-based gold (Au) wire-grid polarizer was designed for the  $3\ \mu\text{m} \sim 5\ \mu\text{m}$  mid-wave infrared (MWIR) wavelength range. The introduction of an  $\text{MgF}_2$  dielectric layer between the Au grid and the Si substrate was proposed to improve the transmittance of transverse magnetic (TM) waves and the extinction ratio (ER) of the wire-grid polarizer. The structural parameters of the Au grid on the Si substrate were optimized using COMSOL simulation software. The results show that the average transmittance of TM waves is 93%, and the average polarized ER is 39.3 dB. In addition, a method of using tungsten (W) as a new metal material to improve the polarization performance of the wire-grid polarizer was proposed. The simulation results show that the average transmittance of TM waves is 92.7%, and the average polarized ER is 64.4 dB. However, the W has higher hardness and higher requirements on the etching process. It is expected to make superior MWIR wire-grid polarizers through advances in process and technologies.

**Key words:** metal wire-grid polarizer; Si substrate; Au wire grid; W wire grid; polarization extinction ratio

## 引言

自然界所产生的光波偏振信息是人类学习和

认识自然界的重要方式之一。物体所产生的偏振信息受到物体种类、材质、表面粗糙度、理化特性

收稿日期: 2023-11-20; 修回日期: 2024-01-08

基金项目: 陕西省技术创新引导专项秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目 (2024QCY-KXJ-179); 陕西省重点研发计划关键核心技术攻关项目 (2024QY2-GJHX-45)。

作者简介: 王佩瑶 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事偏振光学成像技术研究。E-mail: wpy20002266@163.com

等一系列因素的影响。中波红外金属线栅偏振片被广泛地应用于遥感探测、光通信、光学成像等领域<sup>[1]</sup>。为了实现对中波红外偏振信息的精准探测和识别,对中波红外偏振片的制作精度、灵敏度、偏振消光比等相关参数提出了更高的要求。

2014年,日本YAMADAI等人<sup>[2]</sup>在Si基底上制备了线栅周期为400 nm、金属线高为260 nm、占空比为0.5的光栅结构,当入射角角度为0度时,TM波的透过率大于60%,偏振消光比可达22.2 dB。

2016年,PATRIZIAM等人<sup>[3]</sup>使用合金作为金属线栅的材料,使用有机物作为基底材料设计并制备了应用在THz波段上,偏振消光比能够达到20 dB的金属线栅偏振器。

2018年,孔园园等人<sup>[4]</sup>在蓝宝石基底上制备了线栅周期为400 nm、金属线高为100 nm、占空比为0.5的单层金属Al线栅结构,通过引入低折射率材料充当增透层,降低了蓝宝石基底的表面剩余反射率,通过测试,在3 μm~5 μm波段上TM波的透过率为83.3%,偏振消光比为10 dB。

2021年,付秀华等人<sup>[5]</sup>采用间歇镀铝法在Si基底上制备了具有高偏振性能的亚波长单层金属Al线栅偏振片,其光栅周期为300 nm、金属线高为100 nm、占空比为0.5、TM波透过率为70.19%、偏振消光比为26.8 dB。

TM波的透过率和反射率、TE波的透过率和反射率、偏振消光比是评价金属线栅偏振片偏振性能的重要指标。TM波的透过率越高,TE波的透过率越低,则偏振消光比越高,金属线栅偏振片的偏振效果越好。通常情况下,高的偏振消光比需要金属线栅具有高的深宽比。2023年,赵传等人<sup>[6]</sup>采用沉积工艺在SiO<sub>2</sub>基底上制备了线栅周期为78 nm、金属线高为208 nm、线栅宽度为52 nm的金属线栅偏振片,其深宽比高达4。

目前,国内外研究的金属线栅偏振片TM波透过率基本处于90%以下,偏振消光比在20 dB左右,无法同时满足高TM波透过率与高偏振消光比的应用需要,需要创新性地对结构材料的选择以及相关参数的设计<sup>[7]</sup>。本文针对3 μm~5 μm的中波红外波段,采用单层金属线栅结构,使用COMSOL模型进行仿真分析,对比了以Si作为基底和以金属Au作为线栅金属材料时,金属线高 $h$ 、占空比 $f$ (即线栅宽度 $\omega$ 与线栅周期 $p$ 的比值)<sup>[8]</sup>、有无增透层及不同增透层厚度 $b$ 等相关参数对于金属

线栅偏振性能的影响。研究了表面等离子基元(SPP)与增透层的物理机制,创新性地提出将金属钨(W)作为线栅金属材料,并仿真了钨线栅在3 μm~5 μm中波红外波段范围内TM波的透过率以及金属线栅的偏振消光比。实验结果表明,金属线栅的偏振性能明显提升,而且金属钨结构稳定,耐高温、耐腐蚀,有利于提高金属线栅的坚固性和精确性。

## 1 金属线栅结构的理论计算及仿真构建

中波红外金属线栅应用于3 μm~5 μm范围内,属于亚波长元件。金属线栅结构的周期远小于入射光的波长,零阶等效介质理论成立,只需关注零级衍射光的透过率,即衍射级次不超过 $m=1$ <sup>[9]</sup>。根据亚波长元件的衍射周期理论,线栅周期可表示为

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

式中: $\lambda$ 为入射光波长; $m$ 为衍射级次; $n$ 为基底折射率; $\theta$ 为衍射角。硅材料是良好的半导体材料,其微纳加工技术已十分成熟,因此基底材料选用高阻硅<sup>[10]</sup>,其折射率为 $n=3.42$ 。当以3 μm的入射光正入射时,一级衍射的衍射周期 $p=877$  nm,因此金属线栅的周期不应超过877 nm。

金属的折射率主要反映了金属对光波的响应,分为实部和虚部,实部代表金属的色散,虚部代表对光波的吸收。根据零级有效介质理论,TM波和TE波正入射时,其折射率可分别等效为

$$n_{TE} \approx n_1 \sqrt{f} \quad (2)$$

$$n_{TM} = \frac{n_3}{\sqrt{1-f}} \quad (3)$$

式中: $n_1$ 为金属的折射率; $n_3$ 为空气折射率; $f$ 为占空比。即当TE波入射时,金属线栅相当于一层金属,金属的折射率虚部越大,金属对光波的吸收就越大,TE波透过率就越低,反射率就越高,金属线栅偏振滤波效果就越好。当TM波入射时,金属线栅相当于一层介质。同时,考虑到金属线栅属于精密器件,需选择高强度、耐腐蚀和耐热的金属材料,以增加金属线栅的结构稳定性和耐久性,降低变形和损坏的风险。以铝、金、银和铜4种金属为例,他们在4 μm波长下的折射率分别为 $6.1+30.0i$ 、 $2.6+24.6i$ 、 $2.45+25.1i$ 和 $0.7+21.6i$ ,可以看出 $|\text{Im}(\text{Al})| > |\text{Im}(\text{Au})| \approx |\text{Im}(\text{Ag})| > |\text{Im}(\text{Cu})|$ 。从理论上讲,铝的虚部最大,其线栅的偏振效果应该

最好。但是这4种金属中,金的化学性质最稳定,最不活泼,其抗腐蚀性强、延展性好<sup>[1]</sup>,而铝金属线栅在一些特殊环境下可能会遇到腐蚀和氧化等问题。另外,铝的热膨胀系数大,当温度发生变化时,铝金属线栅的微结构尺寸可能会发生变化,从而降低其可靠性、耐久性和精密性。因此,本文在仿真设计时首选金属材料金(Au)。然后,在第3小节中,我们也进一步将金属材料拓展到了金属钨(W)。

由研究可知,Au和Si基底界面处会产生SPP效应,Si基底会对某一波长的光进行强烈吸收。激发SPP的入射波长需满足:

$$\lambda_{\text{spp}} = \frac{p}{\sqrt{i^2 + j^2}} \sqrt{\frac{\epsilon_m + \epsilon_d}{\epsilon_d \epsilon_m}} \quad (4)$$

式中: $p$ 为金属线栅的周期; $\epsilon_m$ 为金的介电常数; $\epsilon_d$ 为Si的介电常数; $i$ 、 $j$ 为整数。为了减少基底对入射光的吸收,减少反射能量损失,应引入单层或者多层增透膜。 $\text{MgF}_2$ 在较宽的范围内有较好的透射效果,甚至能拓宽至紫外光范围,而且还能耐高能辐射<sup>[12]</sup>,因此本文采用 $\text{MgF}_2$ 作为增透膜<sup>[13]</sup>。金属线栅结构示意图如图1所示, $h$ 、 $w_2$ 和 $p$ 分别为金属线栅的高度、宽度和周期, $w_1$ 为金属线栅间的空气间隙, $b$ 为 $\text{MgF}_2$ 增透膜的厚度。

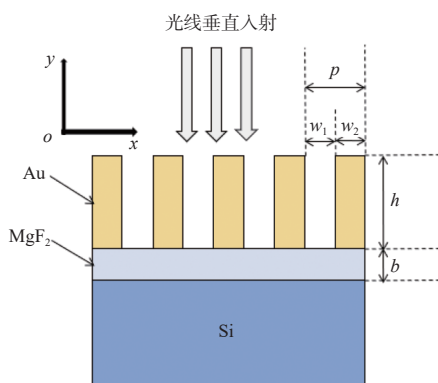


图1 金属线栅结构示意图

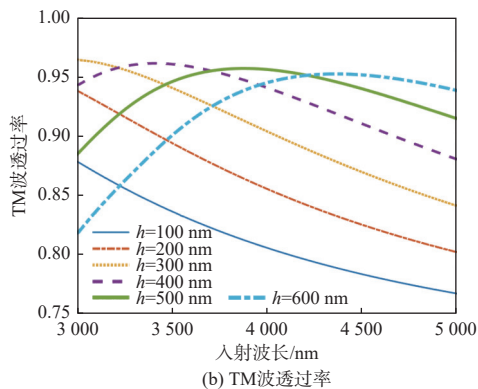
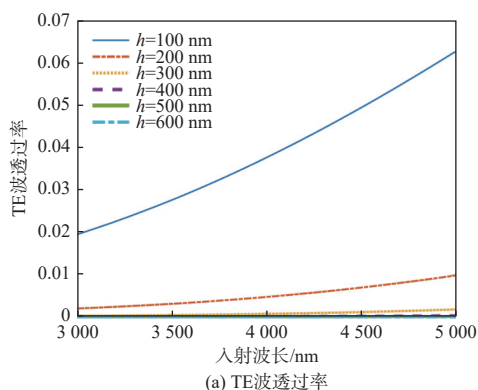
Fig. 1 Structure diagram of metal wire grid

在采用COMSOL软件对如图1所示的金属线栅偏振器结构进行光传输特性仿真时,我们需要进行如下4个步骤的设置和数据处理:1) 设置空气域范围、基准位置、Si基底和 $\text{MgF}_2$ 增透膜介质的宽度和厚度、线栅金属材料类型及5组金属线栅的宽度和高度;2) 选择坐标系为全局坐标系,设置输入端口处的光输入功率和入射角,设置输入端口的类型为周期性、波激励为开;设置输出端

口的类型为周期性、波激励为关;3) 设置网格的最小单元尺寸为 $0.001 \mu\text{m}$ 、最大单元的尺寸和增长率分别为 $0.01 \mu\text{m}$ 和1.3、曲率因子为0.3、狭窄区域分辨率为1、校准类型为普通物理学;4) 设置数据集的来源及表达式,以及一维绘图组,输出TE波或TM波的反射率、透射率等文本信息,计算偏振消光比。

## 2 基于金(Au)的金属线栅偏振器的设计

为了提高金属线栅的偏振性能,需要对金属线栅的参数进行优化。影响金属线栅偏振性能的参数有周期 $p$ 、占空比 $f$ 、增透膜厚度 $b$ 、金属线高 $h$ 等<sup>[14]</sup>。随着线栅金属高度的增加,金属的欧姆损耗会引起TM波透过率降低,金属薄膜对电磁波的消散特性会引起TE波透过率下降<sup>[15]</sup>。TM波、TE波透过率都下降,TE波透过率下降程度更大,使线栅的偏振消光比逐渐增大。TM波透过率和偏振消光比不能同时达到最优解。固定其他参数不变,图2给出了TE波透过率( $T_{\text{TE}}$ )、TM波透过率( $T_{\text{TM}}$ )和偏振消光比( $E_R$ )随金属线高的变化关系。为了保证TM波透过率总体上大于85%,偏振消光比总体上大于35 dB,后续关于Au线栅偏振片的设计中我们选取金属线高为 $h=400 \text{ nm}$ 。





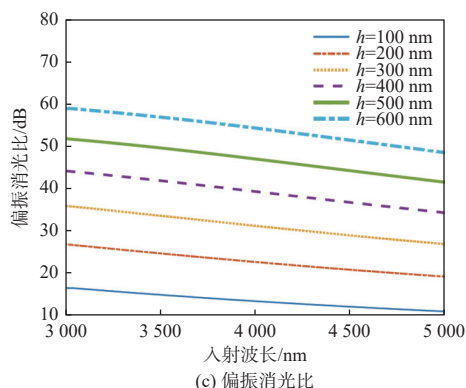
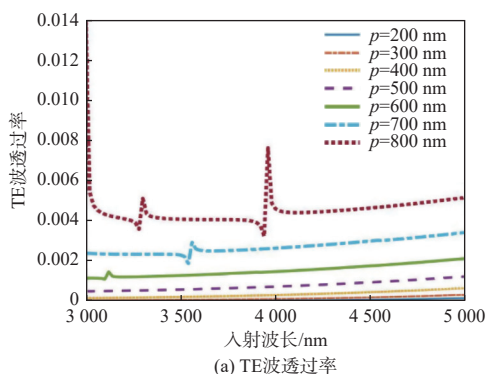


图2 金属线高  $h$  不同时,  $T_{TM}$ 、 $T_{TE}$ 、 $E_R$  随波长变化的对比图

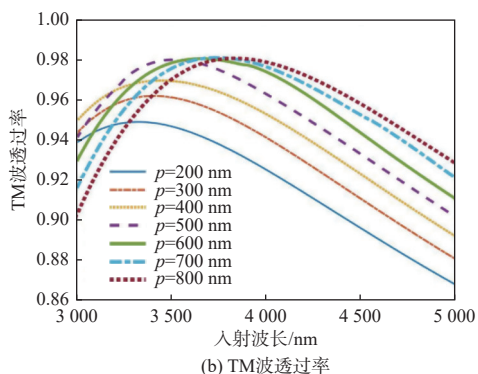
Fig. 2 Comparison of variation of  $T_{TM}$ ,  $T_{TE}$  and  $E_R$  with wavelengths under different metal thicknesses  $h$

占空比定义为线栅宽度  $\omega$  与线栅周期  $p$  的比值, 改变占空比无法同时提高金属线栅的 TM 波透过率和偏振消光比。随着占空比增大, 线栅的 TM 波透过率降低, 但偏振消光比增大, 根据中波红外波段对于消光比的要求, 本文选取占空比  $f=0.5$ 。

确定线栅的金属高度  $h=400$  nm、占空比  $f=0.5$ , 利用 COMSOL 对金属线栅的周期  $P$  和增透膜厚度  $b$  进行模拟。选取不同金属线栅周期, 测量偏振元件的 TM 波透过率、TE 波透过率与偏振消光比, 结果如图 3 所示。



(a) TE 波透过率



(b) TM 波透过率

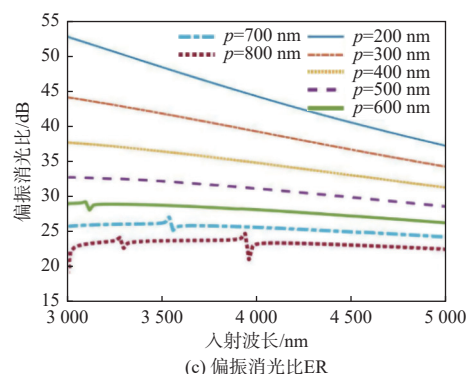


图3 不同周期值下,  $T_{TM}$ 、 $T_{TE}$ 、 $E_R$  随波长变化的对比图

Fig. 3 Comparison of variation of  $T_{TM}$ ,  $T_{TE}$  and  $E_R$  with wavelengths under different period values

根据亚波长等效介质理论, 偏振消光比为透射光第 0 阶偏振消光比<sup>[16]</sup>, 偏振消光比计算公式为<sup>[17]</sup>

$$E_R = 10 \times \log \left( \frac{T_{TM}}{T_{TE}} \right) \quad (5)$$

由图 3 可知, 随着金属线栅周期的增大, TE 波透过率增大, 偏振消光比减小, 这是因为增大线栅周期使得 TE 波与自由电子碰撞的频率减小, 从而减小了对 TE 波的损耗。当周期  $p=200$  nm 时, TM 波的平均透过率为 91.9%, 偏振消光比为 44.6 dB; 当  $p=300$  nm 时, TM 波的平均透过率为 93%, 偏振消光比为 32.3 dB。因此, 减小金属线栅的周期, 可提高偏振消光比。但考虑到制备条件的约束, 线栅周期不能无限制地减小, 结合对高 TM 波透过率的需求, 周期可选为  $p=300$  nm。

由于在金属和介质界面处会产生 SPP 效应, 使某一波长的光透过率下降, 因此引入增透膜。增透膜的存在可减少反射能量损失, 提高透过率。本文利用采用 COMSOL 软件模拟  $3 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$  波段基底上未镀膜及镀制不同高度单层介质膜时金属线栅偏振元件的 TM 波透过率、TE 波透过率与偏振消光比, 结果如图 4 所示。

由图 4 可知, 未镀膜 (对应图中  $b=0$ ) 时, TM 波平均透过率为 79%, 偏振消光比为 34.7 dB; 镀单层介质膜后, 金属线栅的偏振性能比未镀膜时有明显提升。根据等效介质理论, 未镀膜时, 金属线栅结构相对于 TE 波为一层金属膜, 基底与金属膜形成谐振腔, TE 波在谐振腔内多次反射, 能量增加<sup>[18]</sup>。在基底上镀膜后, 部分 TE 波会直接出射, 谐振效果减弱, TE 波透过率降低, TM 波透过率增大。在

3  $\mu\text{m}$  ~ 5  $\mu\text{m}$  范围内, 对于不同厚度的镀膜, 当  $b=500\text{ nm}$  时, 此时偏振消光比最高, 平均偏振消光比约为 42.4 dB, 但其 TM 透过率最低; 而当  $b=200\text{ nm}$  时, 此时 TM 波透过率最高, 总体高于 88%, 平均透过率为 93%, 平均偏振消光比为 39.3 dB。当  $b=200\text{ nm}$  时整体的偏振性能优于其他增透膜厚度, 因此选用增透膜的高度为  $b=200\text{ nm}$ 。

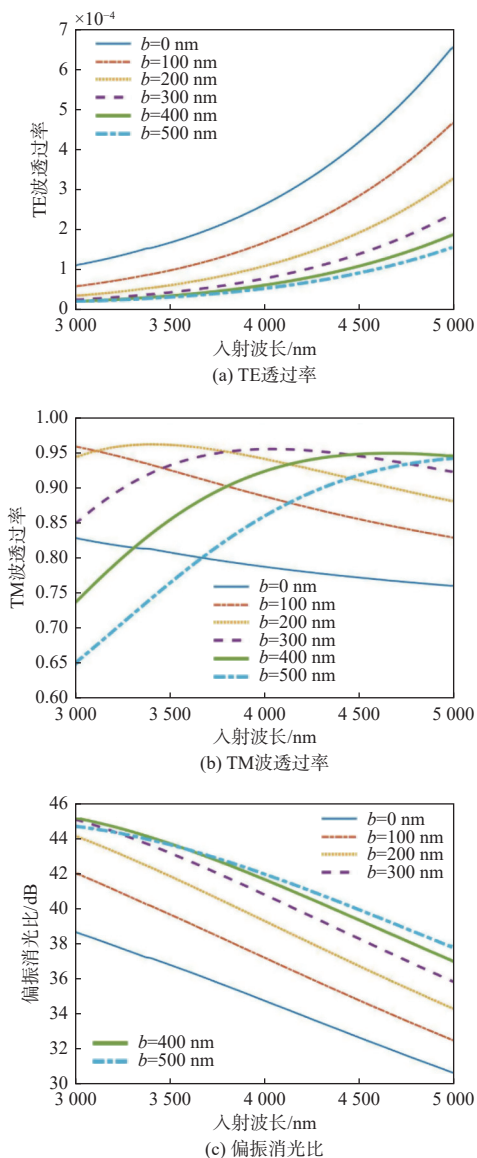


图4 增透膜厚度  $b$  取不同值时,  $T_{\text{TM}}$ 、 $T_{\text{TE}}$  和  $E_{\text{R}}$  随波长的变化

Fig. 4 Variation of  $T_{\text{TM}}$ ,  $T_{\text{TE}}$  and  $E_{\text{R}}$  with wavelengths when anti-reflection film thickness  $b$  taking different values

经过反复多次模拟仿真, 我们确定了金属线栅的结构参数: 周期  $p=300\text{ nm}$ 、金属高度  $h=400\text{ nm}$ 、增透膜厚度  $b=200\text{ nm}$ 。其三维结构示意图如图 5 所示<sup>[19]</sup>。

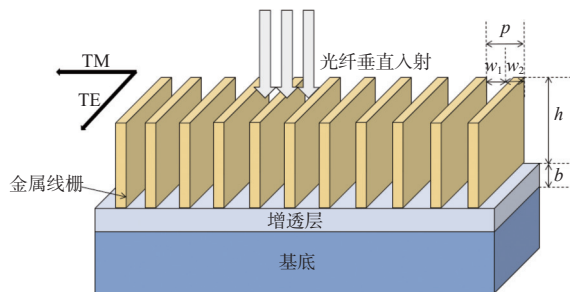


图5 金属线栅三维结构示意图

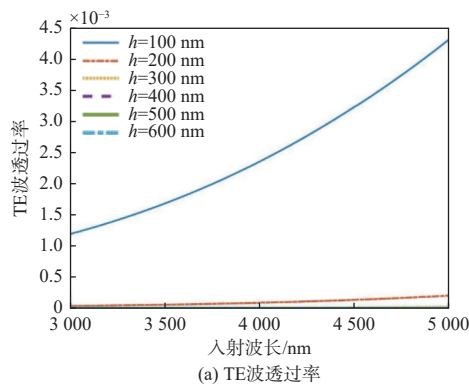
Fig. 5 Schematic diagram of three-dimensional structure of metal wire grid

### 3 基于金属钨(W)的金属线栅偏振器的设计

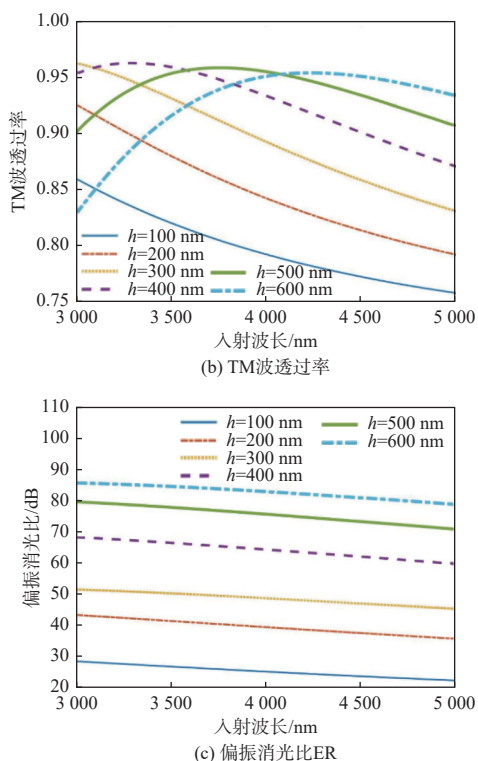
在研究过程中, 我们将金属钨(W) (折射率  $n=1.2+29.3i$ ) 与上述 4 种金属进行对比, 它们之间存在关系  $|\text{Im}(W)| \approx |\text{Im}(Al)| > |\text{Im}(Ag)| \approx |\text{Im}(Au)| > |\text{Im}(Cu)|$ 。可以看出, W 的折射率虚部与 Al 接近, 从而对光波的吸收也比较大, 当用作线栅金属材料时, W 线栅的偏振性能与 Al 线栅相当。另外, W 具有硬度高、熔点高, 常温下在空气中不易被侵蚀等特性, 其化学性质比 Al 稳定, 可以提高金属线栅结构的稳定性和耐久性, 因此 W 适合做金属线栅的金属材料。

本文利用 COMSOL 对钨的最佳线栅参数进行了仿真。随着金属线栅周期的减小, 在相同的线栅面积内 TE 波与自由电子的碰撞频率增加, 从而使能量损失增多, 导致 TE 波的透过率减小, 偏振消光比增大。基于中波红外波段金属线栅对高消光比的需求, 同时考虑到制作金属线栅的精度和技术水平, 本文选取金属钨线栅的周期为  $p=200\text{ nm}$ 。

确定线栅周期  $p=200\text{ nm}$  和占空比  $f=0.5$ , 仿真得到的  $T_{\text{TM}}$ 、 $T_{\text{TE}}$  和  $E_{\text{R}}$  随钨的高度  $h$  的变化结果如图 6 所示。



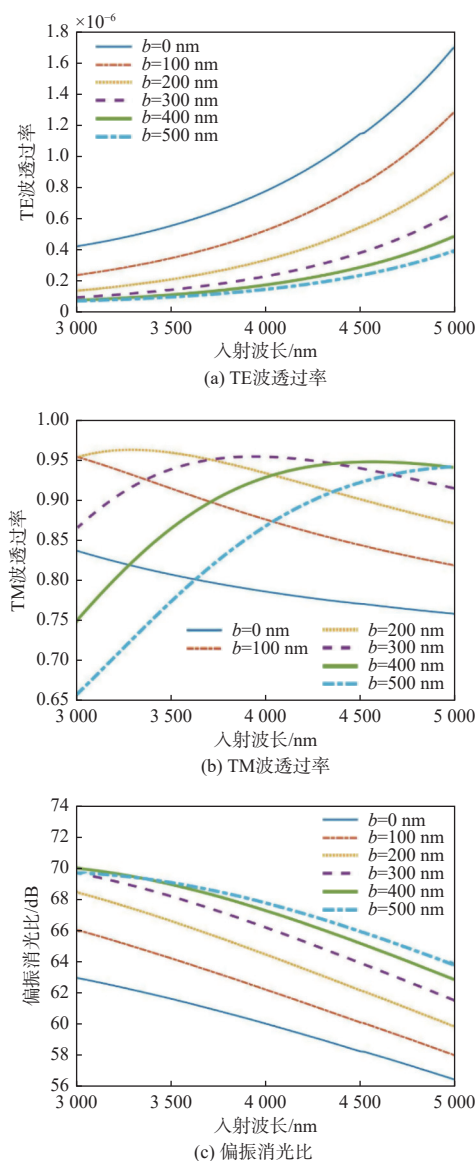
(a) TE波透过率

图6 金属高度  $h$  不同时,  $T_{TM}$ 、 $T_{TE}$  和  $E_R$  随波长的变化Fig. 6 Variation of  $T_{TM}$ ,  $T_{TE}$  and  $E_R$  with wavelengths under different metal thicknesses  $h$ 

由图6可得, 在  $h < 400$  nm 时, 金属线栅的偏振消光比总体小于 52 dB, 在  $3\ \mu\text{m} \sim 5\ \mu\text{m}$  范围内, TM波的透过率大部分低于 90%, 偏振消光比和 TM波平均透过率都较低; 当  $h > 400$  nm 后, TM波平均透过率明显提高。TM波和 TE波透过率都随着  $h$  的增大而下降, 但 TE波透过率下降幅度较大, TM波透过率下降幅度较小, 表现为偏振消光比随  $h$  的增大而增大, 总体高于 60 dB。为使 TM波透过率和偏振消光比都较高, 选用线栅的金属高度为  $h = 400$  nm。当  $h = 400$  nm 时, TM波的平均透过率为 93%, 此高度下 TM波的透过率总体在 85% 以上, 在  $3\ \mu\text{m} \sim 5\ \mu\text{m}$  范围内大部分透过率高于 90%; 偏振消光比为 64.4 dB, TM透过率和偏振消光比都较高。

确定线栅周期  $p = 200$  nm、占空比  $f = 0.5$  后, 仿真得到的  $T_{TM}$ 、 $T_{TE}$  和  $E_R$  随增透层厚度  $b$  的变化如图7所示。由图7可得, 随增透层厚度  $b$  增加, TM波透过率趋势先增高后降低, TE波透过率逐渐降低, 偏振消光比逐渐增大。当增透膜厚度  $b = 200$  nm 时, TM波平均透过率为 92.7%, 总体透过率高于 88%, 平均偏振消光比为 64 dB; 当  $b = 500$  nm 时, TM波的平均透过率为 84%, 总体透过率高于

65%, 平均偏振消光比为 67 dB。经过对比, 为使线栅的透过率在  $3\ \mu\text{m} \sim 5\ \mu\text{m}$  范围内大部分都在 90% 以上, 偏振消光比总体在 60 dB 以上, 选取增透层厚度  $b = 200$  nm。

图7 增透层厚度  $b$  取不同值时,  $T_{TM}$ 、 $T_{TE}$  和  $E_R$  随波长的变化Fig. 7 Variation of  $T_{TM}$ ,  $T_{TE}$  and  $E_R$  with wavelengths when anti-reflection film thickness  $b$  taking different values

通过COMSOL仿真确定金属材料为钨的金属线栅的最佳参数为  $p = 200$  nm、 $h = 400$  nm、 $b = 200$  nm。对比钨、铝、金、铜四种金属的 TM波透过率和偏振消光比, 结果如图8所示。当金属材料选为钨时, TM波透过率总体高于 85%, 其平均透过率与金作为金属材料时相近, 而其平均偏振消光比比金作为金属材料时高 25 dB 左右。由图8



可得,在几种常用的线栅金属材料中,钨线栅的偏振性能最好。同时,钨的性质也最稳定,其具有的高强度、耐腐蚀和耐热等性能,有利于增加金属线栅的结构稳定性和耐久性,因此钨更适合作为线栅金属材料<sup>[20]</sup>。

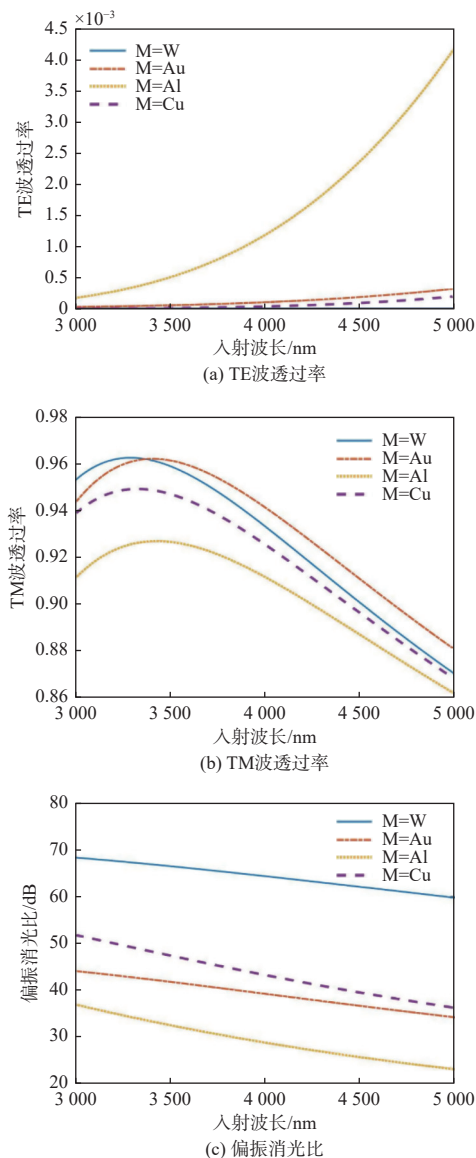


图8 选用不同金属材料时,  $T_{TM}$ 、 $T_{TE}$  和  $E_R$  随波长的变化  
Fig. 8 Variation of  $T_{TE}$ 、 $T_{TM}$  and  $E_R$  with wavelengths for different metal grid materials

钨作为金属材料可以明显提高金属线栅的偏振性能,在目前的金属材料中,钨的偏振消光比最高,效果最好。但钨是一种高密度、高熔点的金属,其熔点达到 3422 °C。这意味着在金属线栅的制作过程中需要使用高温的工艺条件,且钨材料的加工性较差,制备高质量的钨金属线栅需要使用精密加工设备和技术,为完成金属钨的蚀刻加

工需要复杂的工艺控制,对于工艺人员的技能水平也有较高的要求,加工过程有一定难度<sup>[21]</sup>。不过相信随着线栅制作工艺的发展,采用电子束物理气相沉积(EBPVD)等方法,提供高温条件下的薄膜沉积或涂覆,采用电子束加工等加工方法可以获得高精度的结构,使用高真空或惰性气体保护下的制备方法防止钨材料的氧化反应,进而可制备出高质量的钨金属线栅。使用金属钨作为金属线栅材料对于金属线栅偏振片的设计以及制造具有指导性的意义<sup>[22]</sup>。

#### 4 结论与展望

为了提高 3  $\mu\text{m}$ ~5  $\mu\text{m}$  中波红外波段的亚波长金属线栅偏振性能,提出了以 Si 为基底、Au 为金属材料,同时引入  $\text{MgF}_2$  增透膜以降低介质-金属间表面等离子激元效应的金属线栅结构。利用 COMSOL 仿真软件模拟了金属线栅结构参数对 TM 波透过率、TE 波透过率和偏振消光比的影响。计算结果表明,在优化的结构参数下,金属线栅的 TM 波平均透过率为 93%,平均偏振消光比为 39.3 dB,相对于无增透膜金属线栅的平均偏振消光比提高了 5 dB, TM 波透过率提高了 20%。考虑到金属钨(W)在此波段具有的折射率虚部更大,从而对 TE 波吸收更强,以及化学性质更加稳定(耐腐蚀、耐高温)等特性,提出了以 W 替代 Au 来增强金属线栅稳定性的新型结构。计算结果表明,以 W 作为金属材料的金属线栅,其偏振性能显著提升,平均偏振消光比可达 64.4 dB。然而,在制作金属线栅的过程中,微纳结构加工误差会降低线栅的消光比和 TM 波的透过率。为了提高金属线栅的性能,一方面,通过采用金、钨等性质稳定、强度高的金属材料,从优化金属表面粗糙度方面来减小加工误差;另一方面,通过改进纳米压印光刻、离子刻蚀和光刻胶掩模等微纳加工技术来提高加工精度,减小加工误差对金属线栅性能的影响。当然,高的金属硬度对蚀刻工艺和材料提出了更高要求,期待随着工艺和技术手段的进步,后续可以制作出性能优越的中波红外金属线栅偏振器件。

#### 参考文献:

- [1] TYO J S, GOLDSTEIN D L, CHENAULT D B, et al. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(22): 5453-



- 5469.
- [2] YAMADA I, NISHII J, SAITO M. Incident angle and temperature dependence of WSi wire-grid polarizer[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 63: 92-96.
- [3] PATRIZIA M, COLLEONI M, VIDAL B. Flexible sub-THz metal wire grid polarizer based on an EGaIn24.5 alloy[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2016, 6(5): 757-759.
- [4] 孔园园, 罗海瀚, 刘定权. 硅基片上的中波红外铝线栅偏振器设计[J]. *微纳电子技术*, 2018, 55(7): 461-467.  
KONG Yuanyuan, LUO Haihan, LIU Dingquan. Design of a mid-infrared Al wire-grid polarizer on Si substrates[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2018, 55(7): 461-467.
- [5] 付秀华, 林晓敏, 张功, 等. 红外宽波段亚波长金属线栅偏振元件的研制[J]. *中国激光*, 2021, 48(9): 0903002.  
FU Xiuhua, LIN Xiaomin, ZHANG Gong, et al. Development of infrared wide band polarizing elements with sub-wavelength metal wire grids[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(9): 0903002.
- [6] ZHAO Z, MA T, XIAO J R, et al. Compact and efficient wire grid reflecting polarizers at 121.6 nm[J]. *Physica Scripta*, 2023, 98(1): 015007.
- [7] 孔园园. 中波红外金属线栅偏振器的结构设计 with 特性研究[D]. 上海: 中国科学院大学 (中国科学院上海技术物理研究所), 2018.  
KONG Yuanyuan. Structure design and characteristics study of medium-wave infrared metal wire grid polarizer[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [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] 陈娟, 闫连山, 潘炜, 等. 二维金属矩形光栅的偏振控制及其透射特性[J]. *光学学报*, 2011, 31(12): 243-247.  
CHEN Juan, YAN Lianshan, PAN Wei, et al. Arbitrary polarization transformation based on two-dimensional metallic rectangular gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 243-247.
- [10] ARAKAWA E, CALLCOTT T, CHANG Y. Handbook of Optical Constants of Solids[M]. Amsterdam: Elsevier, 1997: 421-433.
- [11] 卢斌. 高性能金属线栅型太赫兹偏振器的研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2016.  
LU Bin. Study on high performance metal wire grid terahertz polarizer[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2016.
- [12] LALANNE P, MORRIS G M. Highly improved convergence of the coupled-wave method for TM polarization[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1996, 13(4): 779-784.
- [13] RODRÍGUEZ-DE MARCOS L V, LARRUQUERT J I, MÉNDEZ J A, et al. Self-consistent optical constants of  $\text{MgF}_2$ ,  $\text{LaF}_3$ , and  $\text{CeF}_3$  films[J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(3): 989.
- [14] SU J C, CHOU S C. Performance comparison of polarized white light emitting diodes using wire-grid polarizers with polymeric and glass substrates[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 100: 40-44.
- [15] BUCHNEV O, BELOSLUDTSEV A, FEDOTOV V A. Polarization discrimination and surface sensing with a near-IR nanostructured hybrid mirror[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(16): 4036.
- [16] WU J, ZHOU C H, CAO H C, et al. Broadband polarizing beam splitter with metal-wire nanograting in near infrared region[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 47: 166-170.
- [17] KIM S, KIM D, LEE Y J, et al. Broadband high-performance terahertz polarizer based on a dense array of 5 nm gap slit antennas[J]. *Optics Express*, 2022, 30(17): 30038-30046.
- [18] JEON J, CHUN B S, SEO Y, et al. Improving infra-red polarized imaging efficiency in a bilayer wire-grid polarizer[J]. *Nanoscale Advances*, 2023, 5(3): 633-639.
- [19] WANG C Y, CHAO Y Y, LIANG J J, et al. Large-area wire grid polarizer with high transverse magnetic wave transmittance and extinction ratio for infrared imaging system[J]. *Advanced Photonics Research*, 2023, 4(2): 2200218.
- [20] YAMADA I, KINTAKA K, NISHII J, et al. Transmittance enhancement of a wire-grid polarizer by antireflection coating[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(2): 316-320.
- [21] 陈盈, 王杰, 高焘, 等. 飞秒激光微加工制备大尺寸无衬底太赫兹线栅偏振器[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(11): 308-312.  
CHEN Ying, WANG Jie, GAO Tao, et al. Fabrication of large-scale free-standing terahertz wire grid polarizer by femtosecond laser micro-machining[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(11): 308-312.
- [22] WANG B, LI H T, SHU W H, et al. Improving the extinction ratio by a novel sandwiched two-layer grating polarizer[J]. *Modern Physics Letters B*, 2015, 29(13): 1550057.