

中波红外集成偏振光栅结构参数对偏振性能影响仿真分析

王伟平 于佳睿 胡小燕 赵少宇

Simulation analysis of mid-wave infrared polarization grating performance influenced by the polarizer structural parameters

Wang Weiping, Yu Jiarui, Hu Xiaoyan, Zhao Shaoyu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20210132>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中波碲镉汞红外偏振焦平面探测器的制备研究 (特邀)

Preparation of medium wave mercury cadmium telluride infrared polarization focal plane detector (*Invited*)

红外与激光工程. 2021, 50(1): 20211008-1-20211008-5 <https://doi.org/10.3788/IRLA20211008>

中波 1280×1024 红外成像组件设计 (特邀)

Design of mid-wave 1280×1024 infrared imaging components (*Invited*)

红外与激光工程. 2021, 50(4): 20211023-1-20211023-9 <https://doi.org/10.3788/IRLA20211023>

等离子微腔耦合长波红外量子阱高消光比偏振探测器 (特邀)

Plasmonic microcavity coupled high extinction ratio polarimetric long wavelength quantum well infrared photodetectors (*Invited*)

红外与激光工程. 2021, 50(1): 20211006-1-20211006-10 <https://doi.org/10.3788/IRLA20211006>

碲镉汞红外焦平面器件技术进展

Development of technologies for HgCdTe IRFPA

红外与激光工程. 2020, 49(1): 0103010-0103010(7) <https://doi.org/10.3788/IRLA202049.0103010>

数字化中波红外焦平面探测器组件研究进展

Review of digital mid-wave infrared focal plane array detector assembly

红外与激光工程. 2017, 46(1): 102003-0102003(8) <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0102003>

采用长波红外高光谱偏振技术的目标探测实验

Experiment of target detection based on long-wave infrared hyperspectral polarization technology

红外与激光工程. 2017, 46(5): 504005-0504005(7) <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0504005>

中波红外集成偏振光栅结构参数对偏振性能影响仿真分析

王伟平, 于佳睿, 胡小燕, 赵少宇

(中国电子科技集团公司信息科学研究院, 北京 100086)

摘要: 中红外集成偏振焦平面探测技术将偏振探测技术与中波红外焦平面成像探测技术融合, 通过异质集成的方式实现偏振光栅和探测器的单片集成, 具有体积小、质量轻, 机械稳定性高等优势, 可实现多偏振方向的同时成像。像元级的亚波长金属光栅可实现不同偏振方向的高消光比, 然而金属材料的选择、光栅的周期、占空比、厚度等参数均会影响偏振探测器的偏振性能。给出了亚波长金属光栅的理论分析, 建立了中波红外集成偏振 HgCdTe 探测器的偏振性能仿真模型, 对不同光栅参数对探测器偏振性能影响进行了仿真分析, 确定了 Al 光栅周期 200~400 nm, 占空比 0.5~0.7, 厚度 > 100 nm 的参数选择。仿真分析得到在 $\pm 14^\circ$ 入射角范围内, 偏振消光比变化较小。同时, 引入了 Si 基 HgCdTe 探测器, 仿真分析了 SiO₂ 增透膜厚度对偏振消光比的影响, 确定了 SiO₂ 最佳厚度在 500 nm 附近, 对 Si 基和 CdZnTe 衬底集成偏振 HgCdTe 探测器的消光比进行对比, 得出了 Si 基探测器偏振性能更优。仿真结果可为中波红外集成偏振 HgCdTe 探测器偏振光栅的设计提供理论指导和参考。

关键词: 中波红外; 碲镉汞焦平面探测器; 亚波长金属光栅; 偏振; 仿真

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210132

Simulation analysis of mid-wave infrared polarization grating performance influenced by the polarizer structural parameters

Wang Weiping, Yu Jiarui, Hu Xiaoyan, Zhao Shaoyu

(Academy of Information Science, China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100086, China)

Abstract: Mid-infrared integrated polarization focal plane detection technology, which combines polarization detection technology and mid-wave infrared focal plane imaging detection technology, has realized the monolithic integration of polarization grating and detector through heterogeneous integration, and has the advantages of small size, light weight, high mechanical stability and simultaneous imaging of multiple polarization directions. Pixel-level sub-wavelength metal gratings can achieve high extinction ratios in different polarization directions. However, the selection of metal material and the structural parameters of gratings such as pitch, duty cycle and thickness have a significant impact on the polarization performance. The theoretical analysis of the sub-wavelength metal grating was given, and the polarization performance simulation model of the mid-wave infrared integrated polarized HgCdTe detector was established, and the effects of different grating parameters on the polarization performance were analyzed. The optimal structural parameters of 200-400 nm Al grating pitch, 0.5-0.7 duty cycle, and over 100 nm thickness were determined by simulation. The simulation results show that the range of $\pm 14^\circ$ incident angle had a small effect on the polarization extinction ratio. Meanwhile, Si-based HgCdTe detector had been introduced. The influence of SiO₂ antireflection film thickness on polarization extinction ratio

收稿日期: 2021-07-15; 修订日期: 2021-08-20

基金项目: 中国电子科技集团公司创新基金

作者简介: 王伟平, 女, 高级工程师, 博士, 主要从事光电微系统方面的研究。

had been simulated to determine the optimal thickness. Compared with Cadmium Zinc Telluride (CdZnTe) substrated polarization HgCdTe detectors, the polarization performance of Si-based detector has been proved better. The simulation results can provide theoretical guidance and reference for the design of the polarization grating of the mid-wave infrared integrated polarization HgCdTe detector.

Key words: mid-wave infrared; HgCdTe FPA; sub-wavelength metal wire-grid polarizer; polarization; simulation

0 引言

任何目标物在反射和辐射电磁波时都会产生特定的偏振特性,偏振特性由目标物本身构成材料的理化特征、粗糙度、含水量等因素共同决定。通常情况下,人造物体具有不自然的光滑表面,它们的反射或者辐射的偏振性能较强,自然背景表面粗糙,反射和辐射的偏振比较弱。因此,红外偏振探测系统可在复杂自然景物背景中提取有用信息,探测人造目标,提高目标的探测识别能力。相较于无偏振成像而言,中波红外偏振成像技术将传统二维空间、强度的三维辐射探测扩展到增加了偏振度和偏振角的五维探测空间,可有效克服一些特殊自然环境和气候条件对侦察构成的障碍,增强红外成像系统的探测能力^[1-5]。特别地,当目标处于水下、大雾天等复杂场景时,有效信息被吸收或散射,导致目标与背景对比度低,通过强度和波长探测进行目标识别比较困难,采用偏振探测可明显改善图像的质量,提高目标成像清晰度^[6-7]。

针对偏振成像,根据 Stokes 理论,需要探测器在不同偏振状态对目标进行多次(至少四次)成像或光强采集,得到对应目标偏振特性的 4 个 Stokes 分量,进而可计算得到对应的偏振度、偏振角等信息,实现偏振成像。传统的偏振成像探测主要包括分时探测^[8]、分振幅探测^[9-10]和分孔径探测^[11],其中分时探测是通过旋转偏振片来实现在不同时间点获得不同偏振方向的信息,该方法简便易行且信号容易处理,但为了避免产生虚像,主要针对静止探测目标进行探测,同时旋转偏振片也会抑制探测器的帧频;分振幅探测是将不同偏振方向的光分束至不同的焦平面探测器上,该方式可同时探测不同偏振方向的信息,但降低了入射至探测器上光强,体积较大,光路复杂,成本较高;分孔径探测是将不同偏振方向的图像投影至焦平面的不同区域,该方式会引起空间分辨率的降低。中波红外集成偏振焦平面探测技术将偏振探测

技术与中波红外焦平面成像探测技术融合,通过异质集成的方式将偏振光栅和探测器进行片上集成,实现单片集成式偏振成像探测。由于采用单片集成形式替代传统分立光学元件,该技术具有体积小,质量轻,结构紧凑,无需转动部件,机械稳定性高等优点,比传统偏振成像技术具有更高的灵敏度,对远距离、微弱信号的探测具有极大的优势。该技术通过专门的拓扑结构进行信号处理,对每个像元的偏振信息进行充分-多次利用,确保不会由于像元偏振态方向的划分而损失空间分辨率。该技术可实现高分辨率、高帧频、低成本、小体积的中波红外偏振成像组件,具有广泛的应用前景,特别是在军事领域中具有很大的潜力^[12-16]。

偏振光栅的结构参数会较大影响探测器的偏振性能,文中针对中波红外集成偏振 HgCdTe 探测器的偏振性能开展仿真分析研究。通过建立仿真结构模型,开展偏振性能仿真分析工作,研究偏振光栅不同结构参数对探测器偏振性能的影响。由于中波红外 HgCdTe 探测器的制备成本较高,通过仿真分析确定偏振光栅的工艺窗口,可减少工艺验证和结构优化的次数,提高工艺验证的效率,降低研发成本。相较于其他针对偏振光栅性能仿真分析的研究,文中主要针对中波红外偏振光栅进行分析,仿真中并非仅针对光栅结构进行独立分析,而是在建模过程中,考虑到探测器芯片本身,以及探测器芯片上的增透膜等对偏振性能的影响,更接近实际应用情况;偏振性能仿真分析中,结合实际使用中光路,仿真分析了斜入射对偏振性能的影响;另外,还考虑工艺加工中可能遇到的脱膜问题,分别针对 CZT 衬底和 Si 基 HgCdTe 探测器的偏振性能进行分析,在 Si 基 HgCdTe 探测器偏振性能仿真分析的过程中,针对偏振性能的最优化目标,还仿真得到了增透膜的最优厚度。因此,文中的仿真建模分析较为全面考虑到实际使用情况,可进一

步提高工艺加工效率。

1 偏振探测器工作原理与仿真模型建立

1.1 集成偏振 HgCdTe 探测器工作原理

任何的偏振光都可以通过 Stokes 矢量 $S=[S_0, S_1, S_2, S_3]^T$ 来描述, 其中 $S_0=I_0+I_{90}$, $S_1=I_0-I_{90}$, $S_2=I_{45}-I_{135}$, $S_3=I_R-I_L$, S_0 、 S_1 、 S_2 为线偏振分量, S_3 为圆偏振分量, I_0 、 I_{90} 、 I_{45} 和 I_{135} 分别表示 0° 、 90° 、 45° 和 135° 不同偏振方向的偏振光分量, I_L 和 I_R 分别表示左旋和右旋圆偏振光光强分量。集成偏振 HgCdTe 探测器采用分焦平面偏振探测成像, 将不同偏振方向的偏振片集成在焦平面上, 和探测器的像元一一对应, 不同像元探测不同的偏振方向。如图 1 所示, 将 2×2 个像元构成一个超像元, 4 个子像元同时探测 4 个不同偏振方向 (例如图 2 所示的 0° 、 45° 、 90° 和 135°) 上的光强信息, 据此可得到 S_0 、 S_1 和 S_2 分量, 由公式 (1) 和公式 (2) 计算得到偏振度 DoLP 和偏振角 AoLP, 进一步处理得到目标的偏振图像。此外, 还可利用探测到的偏振信息, 如 0° 和 90° 的偏振光强信息, 进行偏振复原, 提高水下及雾霾、沙尘等高浓度散射介质下的图像复原质量^[6-7]。需要指出的是, 由此超像元结构探测到的光强信息无法得到 S_3 圆偏分量, 因此无法实现全 Stokes 矢量偏振成像。当探测自然目标时, 其圆偏振分量很小, 可假定为零, 但在探测人造圆柱形结构、大气效应扣除等方面圆偏振分量具备特定的应用效果^[17]。全 Stokes 矢量偏振器件工艺复杂, 目前还较难实现和焦平面探测器的集成, 在文中暂不予以讨论。

$$DoLP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} \quad (1)$$

$$AoLP = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right) \quad (2)$$

集成红外偏振成像探测器采用背光照入射结构, 偏振滤光微纳结构阵列集成在红外成像探测器阵列芯片入射面, 如图 3 所示, 形成偏振像元单元, 用于对目标辐射进行偏振分光。HgCdTe 中波红外探测器采用 n-on-p 器件结构, 探测器阵列芯片制备完成后, 采用双面光刻技术, 在背面光刻出标记, 然后利用高精度光刻与刻蚀技术, 在芯片背面光刻出与正面像元一一对应的滤光结构阵列; 之后与读出电路互连, 形成混成芯片, 经杜瓦封装后, 再进行信号提取和测试评

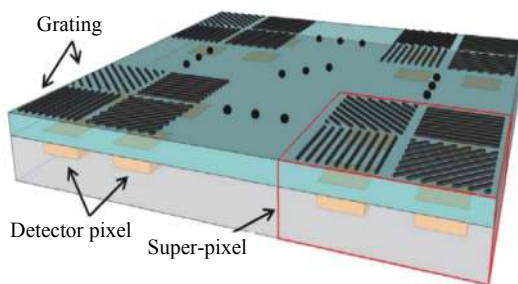


图 1 超像元结构示意图^[18]

Fig.1 Schematic diagram of super-pixel^[18]

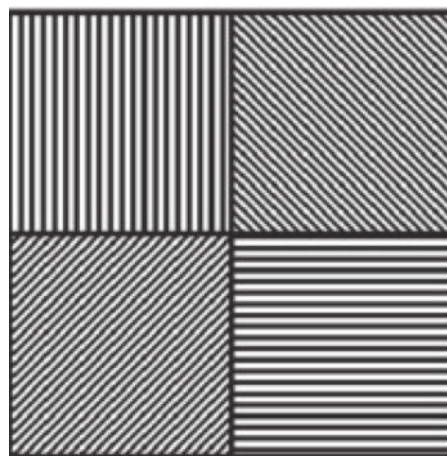


图 2 由 0° 、 45° 、 90° 、 135° 偏振方向像元构成的超像元结构

Fig.2 Super-pixel structure composed of pixels with polarization directions of 0° , 45° , 90° , and 135°

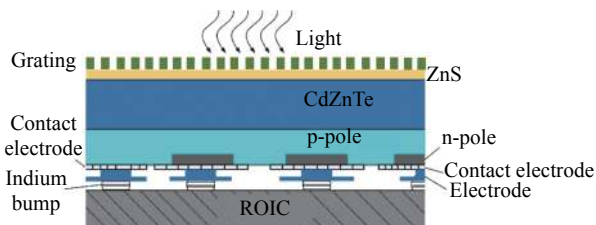


图 3 背照式单片集成金属偏振光栅的 HgCdTe FPA 结构示意图

Fig.3 Structure diagram of back-illuminated HgCdTe FPA monolithic integrated metal polarization gratings

价。集成红外偏振探测器中, 偏振滤光微纳结构的性能直接影响到整个探测器的偏振性能, 是研究的重点和热点之一。

1.2 金属偏振光栅工作原理

金属因其对光的特殊吸收和反射特性, 可用来制作偏振光栅。针对不同偏振方向的光栅, 偏振方向与光栅方向垂直的入射光可以透过光栅, 入射至探测器

像元单元; 偏振方向与光栅平行的入射光可被金属光栅反射和吸收。基于此, 金属偏振光栅可探测出不同偏振方向的光。该现象可用等效介质理论进行解释。

等效介质理论 (Equivalent medium theory, EMT) 适用于光栅周期远小于入射波长时的情况。将周期结构的光栅看作一层均匀介质, 对 TE 和 TM 偏振光, 光栅的等效折射率如下:

$$n_{TE} = \sqrt{DC(n_1 + i\kappa_1)^2 + (1 - DC)(n_1 + i\kappa_1)^2} \quad (3)$$

$$n_{TM} = \sqrt{\frac{(n_1 + i\kappa_1)^2 + (n_2 + i\kappa_2)^2}{DC(n_2 + i\kappa_2)^2 + (1 - DC)(n_1 + i\kappa_1)^2}} \quad (4)$$

式中: DC 为光栅的占空比 (光栅宽度与周期的比值); n, κ 分别为材料折射率与消光系数, 同时也分别为折射率的实部与虚部, 下标 1、2 分别代表光栅材料与光栅缝隙中的材料。当光栅缝隙材料为空气时, $\kappa_2=0$ 。同时, 为了简化计算, 将金属视为完美导体, 即 κ_1 趋于无穷。 TE 和 TM 偏振光的等效折射率简化结果为:

$$n_{TE} = i\kappa_1 \sqrt{DC} \quad (5)$$

$$n_{TM} = n_2(1 - DC)^{1/2} \quad (6)$$

由此可以看出, 简化后金属光栅的折射率针对 TE 偏振光来讲只有虚部, 针对 TM 偏振光来讲, 只有实部。因此, 针对亚波长金属偏振光栅, 对于 TE 偏振光, 光栅折射率只有虚部, 相当于是金属膜, 大部分 TE 偏振光被反射和吸收, 但实际上还会有少量光被透射过去; 对于 TM 偏振光, 折射率只有实部, 可以把光栅层相当于介质层, 光栅对于 TM 光有微弱的吸收, 大部分 TM 偏振光被透射。

1.3 中波红外集成偏振 HgCdTe 探测器仿真模型建立

针对背入射的 HgCdTe FPA 探测器, 亚波长金属偏振光栅集成在探测器的 ZnS 增透膜上。非偏振光经过亚波长金属光栅后为 TM 模式的偏振光, 穿过 ZnS 和 CdZnTe 介质层, 最后偏振光被 HgCdTe 吸收区吸收。由于 HgCdTe 吸收层对入射光偏振角度的响应选择性可以忽略不计, 所以穿过 CdZnTe 衬底层的 TM 波强度大小可以大致表征 HgCdTe 偏振探测器的响应, 因此在模拟仿真时, 只需要模拟偏振光栅、ZnS 和 CdZnTe 介质层的偏振光学性能。仿真结构模型如图 4 所示。

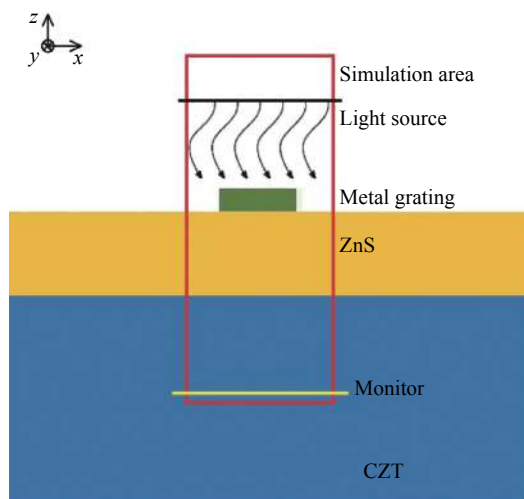


图 4 集成金属偏振光栅的 CZT 衬底 HgCdTe FPA 偏振性能仿真模型

Fig.4 Polarization performance simulation model of integrated metal polarization gratings CZT substrated HgCdTe FPA

根据入射波长和光栅尺寸之间的关系, 当光栅尺寸接近或者小于入射波长时, 需要使用矢量衍射理论进行分析, 其中时域有限差分法 (Finite-difference time-domain, FDTD) 和严格耦合波理论 (Rigorous coupled wave approach, RCWA) 这两种方法是目前应用最广的计算方法。文中采用 FDTD 来进行仿真计算, FDTD 是电磁场数值计算的重要方法之一, 通过对时域的 Maxwell 方程中心差分方式进行离散化, 以此来近似方程的偏导数。采用 Yee 元胞对空间进行划分, 实现磁场和电场的离散化, 在给定的初始条件和边界条件下, 按照时间顺序来交替计算下一时刻对应的电场和磁场分布^[19]。在实际的仿真计算中, 需要对计算空间有所限制, 采用不同的边界条件来确保在有限空间中进行电磁场的数值计算。

采用 FDTD 仿真软件 Lumerical FDTD 进行仿真, 入射光波长范围为 3~5 μm 。入射光正入射时, 边界条件设置为周期边界条件, 入射光斜入射时, 边界条件设置为 Bloch 边界条件。在光传播的方向上, 边界条件采用完美匹配层 (PML), 用于吸收反射和传输光子。仿真分析中, 关注 TM 光、 TE 光透过率的变化和消光比变化趋势。采用 TM 光与 TE 光透过率的比值来表征消光比。由于 TM 光波的透过率直接影响到探测器可探测到的光强, 因此在保证消光比的同时, TM 光波的透过率越大越好。

2 不同结构参数对偏振性能影响分析

2.1 金属偏振光栅材料的选择

金属偏振光栅材料不仅影响其偏振性能,还影响工艺制备的难易。分别选择金、银、铝、铜四种金属材料,仿真分析偏振光栅的性能。仿真的结果如图 5 所示。

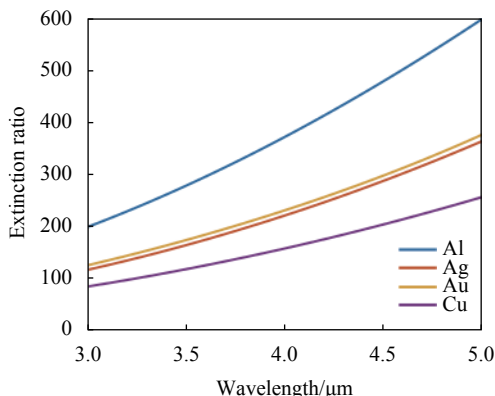


图 5 不同金属对应的偏振消光比曲线

Fig.5 Polarization extinction ratio curves of different types of metals

由仿真结果可得,金属 Al 对应偏振光栅的消光比要远高于其他三种金属,这是因为 Al 有较大的介电常数虚部,使得 *TE* 波的衰减更加明显,从而获得较高的消光比。因此,针对中波红外偏振光栅,通常选择 Al 来制备光栅。

2.2 金属偏振光栅周期对偏振性能的影响

金属偏振光栅周期的选择对 *TM* 波、*TE* 波透过率及消光比有一定影响。基于如图 4 建立的仿真模型,对周期的影响进行仿真分析。设定 Al 光栅的厚度为 100 nm, 占空比为 0.5, 周期变化范围为 100~1 000 nm, 得到的消光比随周期的变化曲线如图 6 所示。由仿真结果可得,消光比随着周期的减小而增加。进一步分析可得,当光栅周期 > 600 nm 时,消光比很小,几乎无偏振效果;光栅周期 < 200 nm 时,消光比随光栅周期变化剧烈;光栅周期在 200~600 nm 之间时,消光比变化趋势较缓。这种现象的出现主要是因为光栅周期 > 600 nm 时, *TM* 和 *TE* 的透过率都较小,消光比较小;周期在 200~600 nm 之间时, *TM* 透过率增大,消光比提高;周期 < 200 nm 时, *TE* 的透过率迅速降低,使得消光比提升较大。周期从 100~1 000 nm 变化的过程中, *TM* 光波的透过率变化 ~10%。考虑到消光比大小、透过率的大小和工艺制

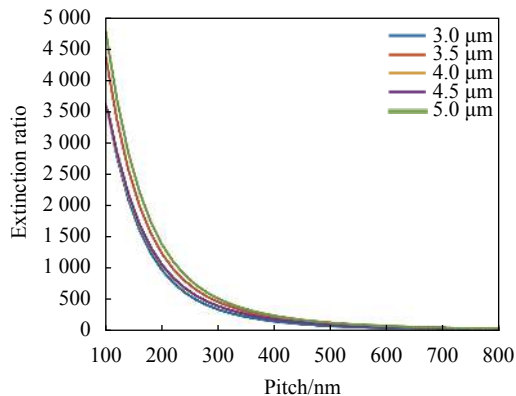


图 6 偏振光栅周期对消光比的影响

Fig.6 Influence of polarization grating pitch on extinction ratio

备的难易程度,一般选择光栅周期在 200~400 nm。

2.3 金属偏振光栅占空比对偏振性能的影响

金属偏振光栅占空比变化时,其偏振性能也会发生变化。设定金属偏振光栅周期为 400 nm, 光栅厚度为 100 nm, 占空比的变化范围为 0.2~0.8, 得到的消光比随占空比的变化曲线如图 7 所示。由仿真结果可得,消光比随占空比的增加而增加。这是因为 *TE* 波的透过率随占空比的增加而减小,使得消光比随占空比增加而增加。占空比增加时, *TM* 光波的透过率下降,但下降趋势与 *TE* 光波透过率下降趋势相比,较缓慢,因此消光比仍随占空比的增加而增加。综合考虑 *TM* 波的透过率和偏振光栅的消光比,实际中选择金属偏振光栅的占空比在 0.5~0.7。

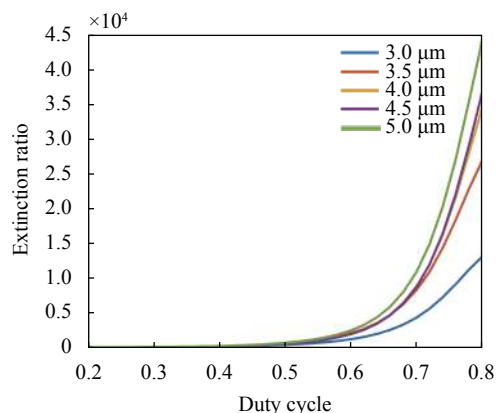


图 7 偏振光栅占空比对消光比的影响

Fig.7 Influence of polarization grating duty cycle on extinction ratio

2.4 金属偏振光栅厚度对偏振性能的影响

仿真分析金属偏振光栅的厚度对偏振性能的影响,设定 Al 偏振光栅周期为 400 nm, 占空比为 0.5, 光

栅厚度变化范围为 50~150 nm, 仿真分析其厚度变化对消光比的影响, 结果如图 8 所示。由仿真结果可得, 光栅厚度越大, 消光比越高, 分析可得厚度的变化对 *TM* 波的透过率影响较小, 消光比的提升主要取决于 *TE* 透过率随光栅厚度的增加而降低。

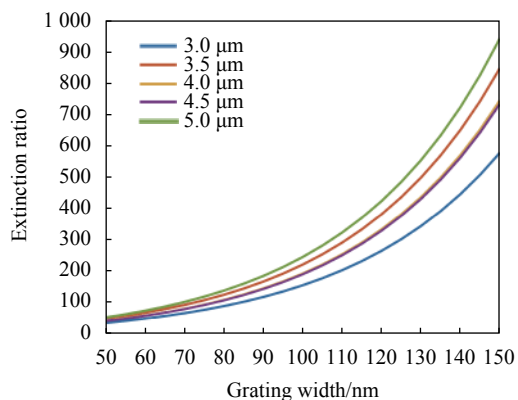


图 8 偏振光栅厚度对消光比的影响

Fig.8 Influence of polarization grating thickness on extinction ratio

2.5 小结

本节通过仿真, 分析了金属材料、光栅周期、占空比和厚度对光栅偏振性能的影响。由仿真结果可得, 选择金属偏振光栅材料为 Al 时, 偏振消光比较高; 针对光栅周期、占空比和厚度的选择, 要综合考虑待探测偏振方向的光波的透过率、消光比和工艺加工的难度。对于图 3 中的中波红外集成偏振 HgCdTe 探测器, 偏振光栅结构参数仿真结果如表 1 所示, Al 偏振光栅结构参数可选择周期为 200~400 nm, 占空比为 0.5~0.7, 厚度 > 100 nm。

表 1 中波红外集成偏振探测器偏振光栅参数仿真结果

Tab.1 Polarization grating parameters simulation results of mid-wave infrared integrated polarization detector

Parameters	Material	Pitch/nm	Duty cycle	Thickness/nm
Results	Al	200-400	0.5-0.7	>100

3 斜入射对偏振性能的影响

第 2 节中的仿真分析都是基于入射光垂直入射的情况。然而, 在制冷型中波红外探测器组件中, 入射到偏振光栅上的光并不是垂直入射的, 而是有一定入射角度的光。考虑 HgCdTe 探测器组件冷屏中光

路对应的 *F* 数为 2 时, 对应入射角度下消光比的仿真分析结果如图 9 所示。由仿真结果可得, 在一定入射角范围内 ($\pm 14^\circ$), 入射角的变化对消光比的影响较小, 随着入射角度的增加, 消光比稍有提高。这是因为斜入射的角度越大, 金属光栅结构对 *TE* 波的反射作用越强, *TE* 波的透过率越小, 从而使得消光比提升。入射角度越大, *TE* 光波的反射率变化越快, 因此可以推测进一步增加入射角度, 消光比的变化将更加明显。

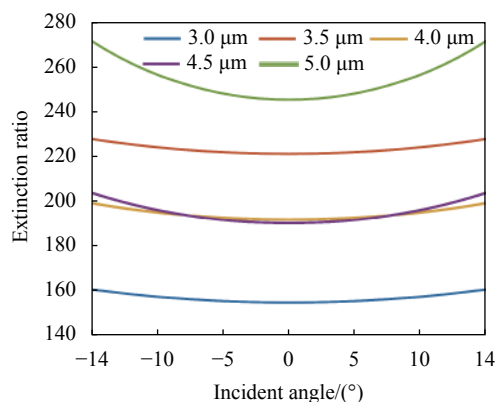


图 9 入射光角度对消光比的影响

Fig.9 Influence of incident angle on extinction ratio

4 Si 基 HgCdTe 探测器偏振性能分析

文中的仿真分析是基于 CdZnTe 衬底的中波红外 HgCdTe 探测器, 然而, 在制备 Al 偏振光栅的过程中, 需要在 ZnS 增透膜上镀金属, 之后刻蚀。在制备的过程中, ZnS 易吸潮, 造成脱膜; 同时, 由于 CdZnTe 的成本较高, 使得 Al 偏振光栅工艺验证成本较高, CdZnTe 对工艺条件要求较为苛刻, 工艺制备难度高。基于此, 考虑 Si 基中波红外 HgCdTe 探测器上制备 Al 偏振光栅。Si 衬底成本较低, 可降低偏振光栅的工艺验证成本, 适用于大阵列规模的探测器制备, 均匀性较好, 工艺相对可控。因此, 针对 Si 基集成偏振中波红外 HgCdTe 探测器的偏振特性开展仿真分析。建立的仿真模型如图 10 所示, Si 衬底上外延生长 SiO_2 作为增透膜, 通过仿真分析 Si 基 HgCdTe 探测器的偏振性能。Al 偏振光栅的结构参数影响和上文 CdZnTe 基衬底的仿真结果类似, 重点关注 SiO_2 厚度的影响, 以及其与 CdZnTe 基衬底偏振探测器的消光比的对比情况。

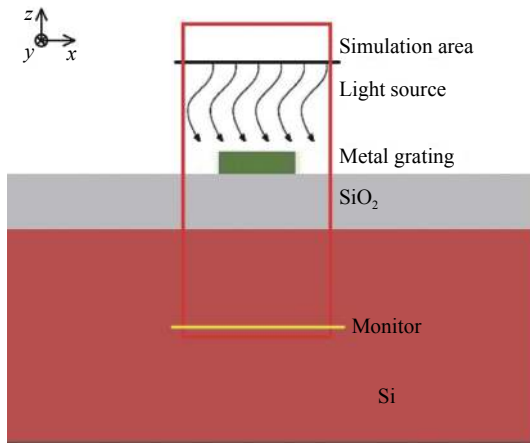


图 10 集成金属偏振光栅的 Si 基 HgCdTe FPA 偏振性能仿真模型
Fig.10 Polarization performance simulation model of integrated metal polarization gratings Si substrated HgCdTe FPA

4.1 SiO₂ 的厚度对偏振消光比的影响

根据文中的仿真分析结果, 设定偏振光栅的周期为 400 nm, 占空比为 0.5, 光栅的厚度为 100 nm, SiO₂ 厚度的取值范围为 100~1 000 nm, 仿真分析其在 3~5 μm 入射光波下的偏振性能。仿真结果如图 11 所示。由仿真结果可得, SiO₂ 层作为增透膜, 针对不同的工作波长有最佳的厚度, 考虑整个工作光谱范围, 选择 SiO₂ 厚度在 500 nm 附近。

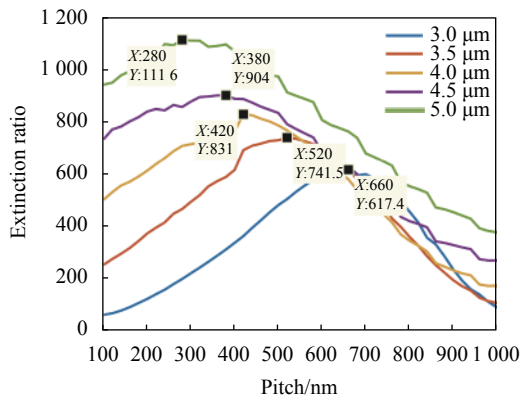


图 11 SiO₂ 厚度对 Si 基 HgCdTe 探测器消光比的影响
Fig.11 Influence of SiO₂ thickness on Si substrated detector extinction ratio

4.2 Si 基和 CdZnTe 基偏振性能对比

将 Si 基与 CdZnTe 衬底集成偏振 HgCdTe 探测器的消光比进行对比, 选择偏振光栅的结构参数一致, 偏振性能的对比如图 12 所示。由仿真结果可得, 相较于 CdZnTe 衬底集成偏振 HgCdTe 探测器, Si 基偏

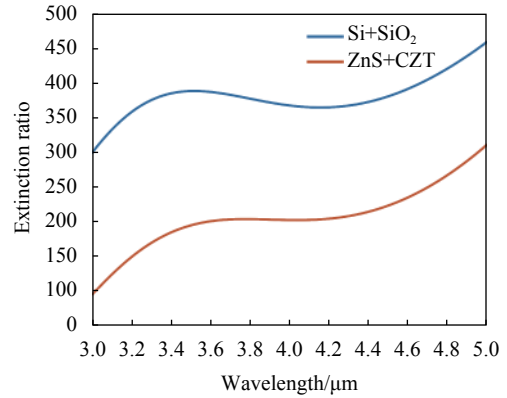


图 12 Si 基和 CdZnTe 衬底相同结构参数的 Al 偏振光栅偏振性能
Fig.12 Polarization performance of Al polarization gratings of Si substrated and CdZnTe-based with the same structural parameters

振探测器的偏振消光比更高, 偏振性能更优。

5 结 论

文中针对片上集成式的中波红外偏振 HgCdTe 探测器的金属偏振光栅结构参数对偏振性能影响进行了仿真分析。确定了中波红外集成偏振 HgCdTe 探测器金属偏振光栅的材料选择 Al 材料, 光栅周期越小、占空比越大、厚度越厚时, Al 偏振光栅的消光比越高。综合考虑偏振光的透过率和工艺加工的难易程度, 确定光栅结构参数的选择范围: 周期 200~400 nm, 占空比 0.5~0.7, 厚度 > 100 nm。仿真分析了斜入射条件下 Al 光栅的消光比, 得到在 ±14° 的入射范围下, 消光比随入射角变化较缓, 然而随着入射角的进一步增大, 消光比将随入射角的增加而迅速增大, 这主要是因为随着入射角的进一步增大, TE 模式光波反射率将急剧增大。为了解决 CdZnTe 衬底中波红外 HgCdTe 探测器中增透膜 ZnS 在制备 Al 偏振光栅过程中脱膜的问题, 提出采用 Si 基 HgCdTe 探测器, 并对 SiO₂ 增透膜厚度对消光比的影响进行仿真分析, 确定了其厚度选择在 500 nm 附近。最后, 比较了 Si 基与 CdZnTe 衬底集成偏振 HgCdTe 探测器的消光比, 同样结构参数下, Si 基偏振探测器偏振性能更优。文中的仿真分析中确定的金属偏振光栅的结构参数, 为中波红外集成偏振 HgCdTe 探测器的制备提供了理论指导, 可减少工艺验证和结构优化的次数, 提高工艺验证的效率, 降低研发成本。然而, 仿真

分析的条件比较理想,在实际制备和测试中,需要考虑工艺误差的影响,同时测试时要确保探测器响应灵敏度足够高,降低测试条件对消光比测试结果的影响。

参考文献:

- [1] Kuroda D, Ishiguro M, Watanabe M, et al. Optical and near-infrared polarimetry for a highly dormant comet 209P/LINEAR [J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, 814(2): 156-164.
- [2] Alvarez-Herrero A, Parejo P G, Laguna H, et al. Polarization modulators based on liquid crystal variable retarders for the Solar Orbiter mission[C]//Proceedings of SPIE, 2015, 9613: 96130L.
- [3] Piqueras J, Heerlein K, Werner S, et al. CMOS sensor and camera for the PHI instrument on board Solar Orbiter: evaluation of the radiation tolerance[C]//Proceedings of SPIE, 2012, 8453: 845314.
- [4] Fomin B A, Falaleeva V A. The vertical structure of aerosols and clouds derived from satellites equipped with high-resolution polarization sensors [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(15): 1653-1664.
- [5] Atkinson G A, Hancock E R. Recovery of surface orientation from diffuse polarization [J]. *IEEE Trans Image Process*, 2006, 15(6): 1653-1664.
- [6] Li X, Hu H, Zhao L, et al. Polarimetric image recovery method combining histogram stretching for underwater imaging [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 110-119.
- [7] Hu Haofeng, Li Xiaobo, Liu Tiegeng. Recent advances in underwater image restoration technique based on polarimetric imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(6): 0603006. (in Chinese)
- [8] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, et al. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(22): 5453-5469.
- [9] Goldstein D. Mueller matrix dual-rotating retarder polarimeter [J]. *Appl Opt*, 1992, 31(31): 6676-6683.
- [10] Harnett C K, Craighead H G. Liquid-crystal micropolarizer array for polarization-difference imaging [J]. *Appl Opt*, 2002, 41(7): 1291-1296.
- [11] Pezzaniti J L, Chenault D B. A division of aperture MWIR imaging polarimeter[C]//Proceedings of Optics & Photonics Polarization Science and Remote Sensing II, 2005, 5888: 58880V.
- [12] Wang Jun, Ding Na, Li Jianjun, et al. Infrared polarization imaging: detection and recognition of camouflage target [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(3): 441-445. (in Chinese)
- [13] Treibitz T, Schechner Y Y. Active polarization descattering [J]. *IEEE Trans*, 2009, 31(3): 385-399.
- [14] Shwartz S, Namer E, Schechner Y Y. Blind haze separation[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2006, 2: 1984-1991.
- [15] Tyo J S, Rowe M P, Pugh E N, et al. Target detection in optically scatter media by polarization-difference imaging [J]. *Appl Opt*, 1996, 35(11): 1855-1870.
- [16] Lin S S, Yemelyanov K M, Pugh E N, et al. Separation and contrast enhancement of overlapping cast shadow components using polarization [J]. *Opt Exp*, 2006, 14(16): 7099-7108.
- [17] Hu Qiaoyun, Yang Weifeng, Hu Yadong, et al. Principle and simulation of a spatially modulated full Stokes parameters polarizaiton imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0211004. (in Chinese)
- [18] Rogalski A. History of infrared detectors [J]. *Opto-Electronics Review*, 2012, 20(3): 279-308.
- [19] Zhang Yingjie. The design and mechanism analysis of subwavelength metallic grating filter [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014: 18-24. (in Chinese)