

# 面向大气背景光抑制的金属光栅偏振片效能表征及设计

冯 斌<sup>1,2</sup> 史泽林<sup>1,2</sup> 徐保树<sup>1,2</sup> 张程硕<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016

<sup>2</sup>中国科学院光电信息处理重点实验室, 辽宁 沈阳 110016

<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 为了定量评价和合理设计偏振滤波抑制大气背景光的金属光栅(WG)偏振片,提出了WG偏振片效能表征模型。该方法利用严格耦合波(RCW)理论计算了WG偏振片的TM和TE偏振透射率,并结合偏振滤波抑制大气背景光的效能计算模型,提出了在给定光栅材料与结构参数条件下面向大气背景光抑制的WG偏振片效能表征方法。借助该方法,计算分析了一维矩形WG偏振片的大气背景光抑制效能,结果表明:WG偏振片采用金(Au)、铜(Cu)材料抑制大气背景光的效能优于银(Ag)、铝(Al)和铬(Cr)金属;随着线栅高度的增加,WG偏振片抑制大气背景光的效能提高,较优的线栅高度取200 nm以上;较优的线栅周期范围为200~300 nm;随着线栅占空比增大,WG偏振片抑制大气背景光的效能提高。结合目前偏振片制备工艺,设计了面向大气背景光抑制的一维矩形WG偏振片,其中光栅材料为Cu金属、基底材料为二氧化硅(SiO<sub>2</sub>)、占空比为0.5、周期为250 nm、高度为200 nm。

**关键词** 大气光学;金属光栅偏振片;效能表征;大气背景光

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1201003

## Performance Characterization and Design of Wire Grid Polarizer Applied to Airlight Rejection

Feng Bin<sup>1,2</sup> Shi Zelin<sup>1,2</sup> Xu Baoshu<sup>1,2</sup> Zhang Chengshuo<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Opto-Electronic Information Processing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In order to quantitatively evaluate and reasonably design a wire grid (WG) polarizer applied to airlight rejection, a performance characterization method for a WG polarizer is proposed. The method combines rigorous coupled-wave(RCW) analysis and a computational model for performance of airlight rejection utilizing polarization filtering. In the proposed method, RCW analysis is responsible for calculating TM and TE polarization transmission efficiencies. The proposed method is utilized to calculate and analyze the performance of airlight rejection utilizing a dimensional and rectangular WG polarizer and the reached conclusion is that gold (Au) and copper (Cu) grating outperform silver(Ag), aluminum (Al) and chromium(Cr) gratings; the performance of airlight rejection utilizing a WG polarizer is improved with increasing gratings height; the relatively optimal grating height is above 200 nm; the relatively optimal range of a grating period is 200~300 nm; the performance of airlight rejection utilizing a WG polarizer increases with increasing duty cycle of gratings. The designed parameters for a WG polarizer are the grating material of Cu, substrate material of silica(SO<sub>2</sub>), duty cycle of 0.5, grating period of 250 nm and grating height of 200 nm.

**Key words** atmospheric optics; wire grid polarizer; performance characterization; airlight

**OCIS codes** 010.1290; 260.5430; 330.4060; 330.4595

收稿日期: 2015-06-24;收到修改稿日期: 2015-07-23

基金项目: 中国科学院创新基金(CXJJ-14-S116)、国家973计划

作者简介: 冯 斌(1981—),男,博士,副研究员,主要从事波前编码成像、偏振成像、红外成像技术方面的研究。

E-mail: fbsy@sia.cn

## 1 引 言

自 1809 年 Arago 发现大气背景光的偏振特性,人类对大气背景光偏振特性的研究已有 200 多年的历史。最近 20 年随着光电成像技术的迅速发展,对大气背景光偏振特性的研究又重新活跃起来。大气背景光偏振度和偏振角的计算、理论建模和偏振滤波抑制大气背景光的效能评估成为了重要的研究命题,偏振滤波元件(光栅)及其性能和效能评价成为研究热点。

偏振滤波是提高光电成像系统对抗大气干扰能力的重要技术途径<sup>[1-3]</sup>,其中关键光学元件是亚波长金属光栅(WG)偏振片。亚波长金属光栅偏振片由于其特殊的衍射特性、偏振特性、体积小、结构紧凑、耐用、易于集成、可用微机电系统(MEMS)工艺制作等优点,越来越受到人们的关注,随着微纳米加工技术水平的不断提高,已经产生出多种不同的制备工艺来实现 WG 偏振片<sup>[4-6]</sup>。WG 偏振片通常用作高性能的起偏器或者高精度的检偏器,因此 TM 和 TE 偏振透射率和消光比指标广泛地用于评价 WG 偏振片的性能<sup>[7-8]</sup>。与之不同,面向大气背景光抑制的 WG 偏振片是以提高光电成像质量为应用目的,其主要任务是抑制进入光电探测器中大气背景光占总光能的比重,同时尽量保留被探测目标的原始辐射能量,从而改善光电成像系统的成像质量。如何定量评价 WG 偏振片在不同材料及物理参数条件下抑制大气背景光的效果,对合理设计用于大气背景光抑制的 WG 偏振片具有重要价值。目前,针对该问题缺乏合适的效能表征量,为此本文提出 WG 偏振片抑制大气背景光的效能表征方法,并利用该方法计算分析了一维矩形 WG 偏振片的大气背景光抑制效能。

## 2 面向大气背景光抑制的 WG 偏振片效能表征

偏振滤波抑制大气背景光的基本模型如图 1 所示,对于远景成像,地物辐亮度  $L^{object}$  在传输过程中受到大气散射的影响,最终进入偏振片的总辐亮度  $I$  包括地物直射光成分  $D$  和大气背景光成分  $A$ <sup>[1,9]</sup>:

$$I = D + A, \quad (1)$$

式中地物直射光成分  $D$  指地物辐亮度  $L^{object}$  经大气衰减后的成分,且随着场景深度的增大而不断衰减。大气背景光成分  $A$  指由大气散射所引起的,且随着场景深度的增加而增强。在场景深度较大情况下,通常合理假定地物直射光成分  $D$  的偏振度为 0,大气背景光成分  $A$  是部分偏振光<sup>[9]</sup>。在图 1 中,由太阳入射光方向、相机视线反方向和散射粒子中心组成的平面称为入射面(又称为散射平面),太阳入射光方向和相机视线反方向之间的夹角称为散射角,入射面的法线方向平行于大气背景光的偏振角方向。

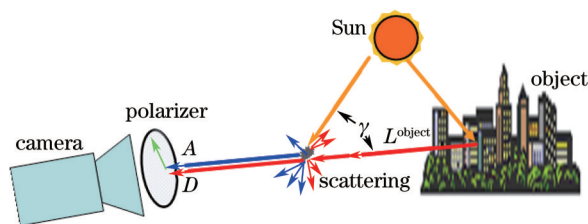


图 1 偏振滤波抑制大气背景光的基本模型

Fig.1 Basic model for airlight rejection utilizing polarization filtering

偏振滤波抑制大气背景光是提高成像质量的重要技术途径。通常利用了大气背景光是部分偏振光的特点,通过在相机前增加可旋转的偏振片,并通过置偏振片的透振方向垂直于大气背景光的偏振角方向来实现<sup>[10]</sup>。利用偏振滤波进行户外观察发现,相同的户外条件下,利用不同的偏振片进行偏振滤波时,大气背景光的抑制效果存在差异;同一偏振片在不同户外条件下(包括太阳方位、观察方向、大气能见度、地物类型等)进行偏振滤波时,大气背景的抑制效果亦存在差异。以上观察表明,偏振滤波对大气背景光的抑制效果不但与偏振片本身的特性有关,而且与太阳方位、观察方向、天气条件和地物类型等多个因素有关,抑制效果的建模过程复杂,需要依据大气状态和观测条件建立工作模型并评估其抑制效果。

大气背景光抑制比(ARR)<sup>[11]</sup>是一个可用于描述在不同大气状态和观测条件下定量计算光学滤波(比如偏振滤波和光谱滤波)抑制大气背景光效能的表征量,ARR 定义为

$$r_{ARR} = T_A / T_D, \quad (2)$$

式中  $T_A = E_A^0 / E_A^1$ , 表示在相机靶面上大气背景光辐照度的衰减倍数,  $T_D = E_D^0 / E_D^1$ , 表示在相机靶面上地物直射

光辐照度的衰减倍数,  $E_A^0$  和  $E_A^1$  分别表示光学滤波前后在相机靶面上大气背景光的辐照度,  $E_D^0$  和  $E_D^1$  分别表示光学滤波前后相机靶面上地物直射光的辐照度。ARR 描述了光学滤波引起相机靶面上大气背景光辐照度和地物直射光辐照度两者衰减倍数之比。

(2)式可改写为

$$r_{ARR} = \frac{E_A^0/E_D^0}{E_A^1/E_D^1}, \quad (3)$$

式中  $E_A^0/E_D^0$  和  $E_A^1/E_D^1$  分别描述了光学滤波前与光学滤波后靶面上大气背景光辐照度和地物直射光辐照度的比例。因此, ARR 能够反映光学滤波前后在相机靶面上大气背景光与地物直射光的比例变化。ARR 值越大, 表示光学滤波抑制大气背景光的效能越好, 成像质量提高越明显; ARR 值越小, 表示光学滤波抑制大气背景光的效能越差, 成像质量下降越严重。

文献[11]构建了抑制大气背景光的效能计算模型。该模型在综合天空光相对光谱辐射功率模型(PSS99模型)<sup>[12-13]</sup>、地面太阳直接辐射光谱模型(SPCTRAL2模型)<sup>[14]</sup>、地物反射特性、偏振片的光学特性、相机响应特性等, 给出了以太阳方位、相机视线方向、大气能见度、偏振片在平行和垂直于其透振方向上光谱透射率等为输入参数的 ARR 计算公式:

$$r_{ARR} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_\lambda A_\lambda^* (1 - \tau_\lambda) d\lambda \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_\lambda g^+(\lambda) \tau_\lambda R_\lambda S_\lambda d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_\lambda A_\lambda^* (1 - \tau_\lambda) [g^+(\lambda) - P_A g^-(\lambda)] d\lambda \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q_\lambda \tau_\lambda R_\lambda S_\lambda d\lambda}, \quad (4)$$

式中  $Q_\lambda$  为相机的光谱响应曲线,  $A_\lambda^*$  为天空光相对光谱辐射功率<sup>[12]</sup>,  $\tau_\lambda$  为大气的光谱透射率,  $R_\lambda$  为地物光谱反射率<sup>[15]</sup>,  $S_\lambda$  为地面太阳直接光谱辐照度<sup>[14]</sup>,  $P_A$  为大气背景光的偏振度<sup>[16]</sup>,  $[\lambda_1, \lambda_2]$  为光学系统的波长响应范围。大气参数  $A_\lambda^*$ 、 $\tau_\lambda$ 、 $S_\lambda$  及  $P_A$  由太阳方位、相机视线方向、大气能见度、场景距离计算得到。

(4)式中与偏振片光学特性相关的参数为

$$g^+(\lambda) = 0.5[g^x(\lambda) + g^y(\lambda)], \quad (5)$$

$$g^-(\lambda) = 0.5[g^x(\lambda) - g^y(\lambda)], \quad (6)$$

式中  $g^x(\lambda)$  和  $g^y(\lambda)$  表示 WG 偏振片在垂直于和平行于栅线方向的透射率, 即 TM 与 TE 偏振透射率。

入射光为近红外和可见光波段时, 要使得 WG 偏振片具有明显的偏振特性, 则要求 WG 偏振片的光栅周期  $d$  远小于入射光的波长  $\lambda$ , 即  $d \ll \lambda$ <sup>[7]</sup>, 此时属于亚波长衍射的问题, 可以利用矢量衍射理论进行衍射效率计算<sup>[17]</sup>。其中, 矢量衍射理论包括严格耦合波(RCW)理论<sup>[17]</sup>、模态理论、时域有限差分法等。目前, RCW 理论是计算周期光栅衍射效率的典型方法, 该方法能够在已知光栅材料与结构参数条件下, 计算 WG 偏振片的衍射效率。

图 2 描述提出的效能表征方法: 1) 根据光栅材料与结构参数, 利用 RCW<sup>[17]</sup>理论计算 WG 偏振片的 TM 和 TE 偏振透射率; 2) 结合偏振滤波抑制大气背景光的效能计算模型, 计算出 ARR; 3) 利用效能表征量 ARR, 计算在不同光栅材料和结构参数条件下 WG 偏振片抑制大气背景光的效能, ARR 取值越大, 抑制效果越好, 反之越差。

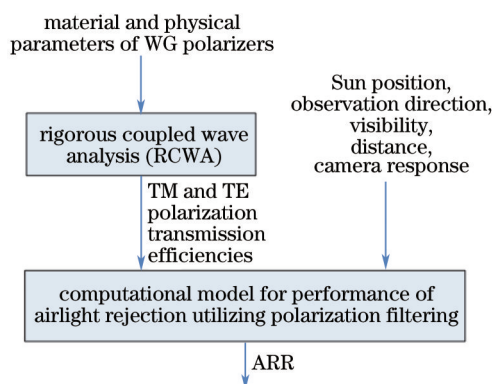


图 2 金属光栅偏振片抑制大气背景光的效能表征方法

Fig.2 Performance characterization method proposed for airlight rejection utilizing wire grid polarizer

### 3 面向大气背景光抑制的 WG 偏振片设计

下面以一维矩形 WG 偏振片为例,其光栅结构如图 3 所示。利用本文效能表征方法计算在不同光栅材料及结构参数(包括光栅周期  $d$ 、高度  $h$  及表示光栅宽度与周期之比的占空比<sup>[18]</sup>  $c/d$ )条件下 WG 偏振片抑制大气背景光的效能,其中取 WG 偏振片基底是折射率为 1.5 的二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )。

由图 2 可知,计算 WG 偏振片在不同光栅金属材料与结构参数条件下 ARR,需要预先指定大气参数(包括大气能见度、大气观测几何和场景距离)、地物特性以及相机特性。本文选取建筑物混凝土的光谱反射率作为(4)式的输入参数  $R_\lambda$ ,如图 4 所示;本文 ARR 计算过程中选用的相机光谱响应曲线如图 5 所示。

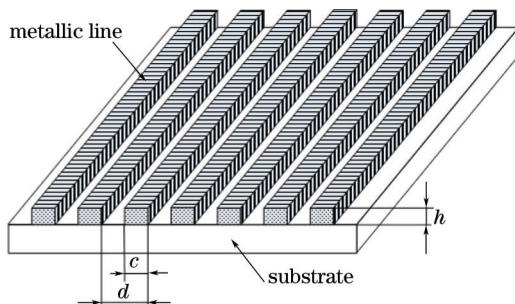


图 3 一维矩形 WG 的结构图

Fig.3 Structure of a dimensional and rectangular WG

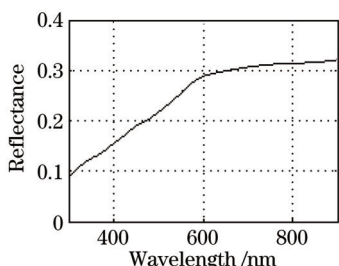


图 4 建筑物混凝土的光谱反射率

Fig4 Spectral reflectance of construction concrete

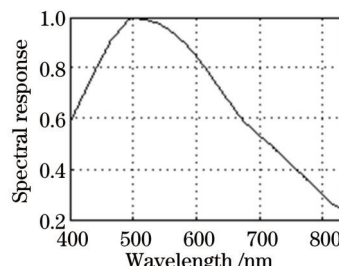


图 5 典型 CCD 相机的光谱响应曲线

Fig.5 Spectral response curve of typical CCD camera

#### 3.1 光栅材料的选取

具有不同光栅材料及结构参数的 WG 偏振片对应着不同的 TM 和 TE 偏振透射率,因此在相同的外部环境下,大气背景光抑制效果通常存在差异。图 6 和图 7 是在金(Au)、银(Ag)、铝(Al)、铬(Cr)和铜(Cu)5 种光栅材料条件下,利用 RCW 计算出的 WG 偏振片的 TM 和 TE 偏振透射率。其中,图 6 对应的光栅结构参数为  $d=120\text{ nm}$ 、 $h=100\text{ nm}$ 、 $c=0.5 d$ ,图 7 对应的光栅结构参数为  $d=240\text{ nm}$ 、 $h=200\text{ nm}$ 、 $c=0.5 d$ 。

表 1 和表 2 均是在大气能见度分别取 20 km 和 10 km,场景距离为 6 km,太阳的方位角为  $0^\circ$ ,太阳的高度角为  $60^\circ$ ,相机高度角为  $2^\circ$ ,同时分别取相机的方位角  $\phi_v$  为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $135^\circ$ (对应的太阳夹角分别为  $58.00^\circ$ 、 $67.45^\circ$ 、 $88.27^\circ$  和  $108.85^\circ$ )条件下,本文分别计算了在不同光栅材料条件下 WG 偏振片的 ARR 值。其中,表 1 与图 6 对应相同的光栅结构参数,表 2 和图 7 对应相同的光栅结构参数。

由图 6 和图 7 可知,以偏振透射率和偏振消光比作为性能评价标准,铝光栅偏振片具有良好的偏振特性。

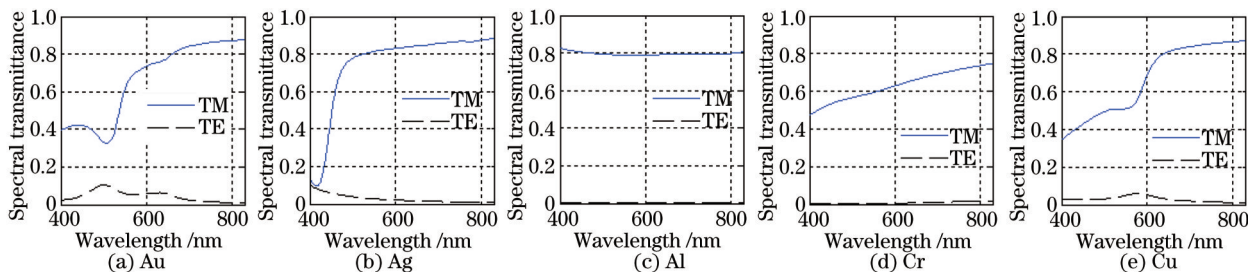


图 6 在不同光栅材料条件下 WG 偏振片的 TM 与 TE 偏振透射率( $d=120\text{ nm}$ ,  $h=100\text{ nm}$ ,  $c=0.5 d$ )

Fig.6 TM and TE polarization transmission efficiencies under condition of different grating materials ( $d=120\text{ nm}$ ,  $h=100\text{ nm}$ ,  $c=0.5 d$ )

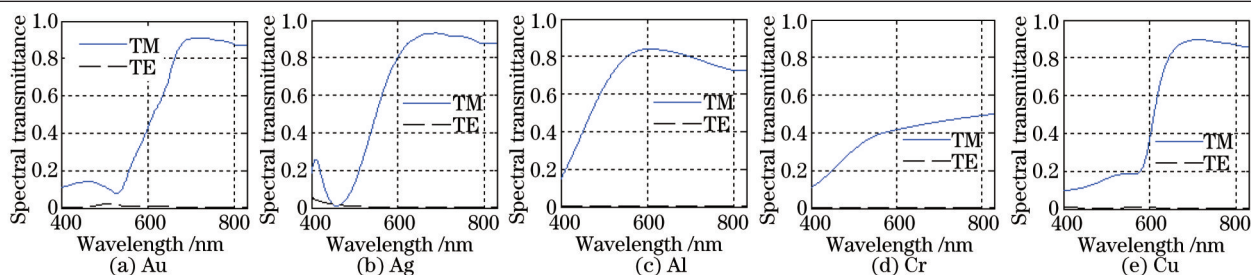


图7 在不同光栅材料条件下 WG 偏振片的 TM 与 TE 偏振透射率( $d=240\text{ nm}$ ,  $h=200\text{ nm}$ ,  $c=0.5 d$ )

Fig.7 TM and TE polarization transmission efficiencies under condition of different grating materials ( $d=240\text{ nm}$ ,  $h=200\text{ nm}$ ,  $c=0.5 d$ )

表 1 在不同光栅材料条件下 WG 偏振片的 ARR( $d=120\text{ nm}$ ,  $h=100\text{ nm}$ ,  $c=0.5 d$ )

Table 1 ARR of WG polarizer under condition of different grating materials ( $d=120\text{ nm}$ ,  $h=100\text{ nm}$ ,  $c=0.5 d$ )

Visibility /km	Observation azimuth /( $^{\circ}$ )	Au	Ag	Al	Cr	Cu
20	0	1.408	1.379	1.259	1.347	1.425
20	45	1.524	1.503	1.381	1.481	1.555
20	90	1.724	1.723	1.604	1.724	1.786
20	135	1.600	1.577	1.442	1.557	1.641
10	0	1.368	1.304	1.182	1.281	1.378
10	45	1.451	1.389	1.261	1.371	1.470
10	90	1.590	1.532	1.398	1.525	1.627
10	135	1.514	1.444	1.304	1.427	1.539

表 2 在不同光栅材料条件下 WG 偏振片的 ARR( $d=240\text{ nm}$ ,  $h=200\text{ nm}$ ,  $c=0.5 d$ )

Table 2 ARR of WG polarizer under condition of different grating materials ( $d=240\text{ nm}$ ,  $h=200\text{ nm}$ ,  $c=0.5 d$ )

Visibility /km	Observation azimuth /( $^{\circ}$ )	Au	Ag	Al	Cr	Cu
20	0	1.843	1.777	1.448	1.496	1.845
20	45	2.056	1.979	1.601	1.655	2.063
20	90	2.452	2.352	1.882	1.950	2.474
20	135	2.262	2.160	1.698	1.763	2.275
10	0	1.838	1.722	1.357	1.423	1.831
10	45	2.000	1.869	1.458	1.532	1.996
10	90	2.288	2.127	1.632	1.720	2.291
10	135	2.177	2.016	1.528	1.612	2.175

由于大气背景光抑制过程受大气介质、天空光源分布及强度、地物目标的特性和偏振成像系统等因素的共同作用, WG 偏振片具有良好的偏振性能并不意味着其将取得良好的大气背景光抑制效果。表 1 和表 2 中, 在多种不同环境(不同能见度和不同相机的方位角组合)和 2 种光栅结构参数条件下, 铜和金光栅偏振片对应的 ARR 值均大于其他 3 种金属光栅偏振片对应的 ARR 值, 这表明 WG 偏振片采用金、铜光栅抑制大气背景光的效能要优于银、铝和铬材料。由图 6 和图 7 可知, 金、铜光栅材料的 WG 偏振片较银、铝和铬光栅 WG 偏振片具有短波截止的光谱滤波特性。以上分析表明, 金、铜光栅偏振片取得良好抑制效果是综合利用偏振滤波特性和光谱滤波特性进行大气背景光抑制的结果, 偏振透射率和消光比评价指标无法有效评价 WG 偏振片抑制大气背景光的效能。

### 3.2 光栅结构参数对 ARR 的影响分析

图 8 是在大气能见度为 12 km, 场景距离为 6 km, 太阳的方位角为  $0^{\circ}$ , 太阳的高度角为  $60^{\circ}$ , 相机高度角为  $2^{\circ}$ , 同时分别取相机的方位角  $\phi_v$  为  $0^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$ 、 $90^{\circ}$  和  $135^{\circ}$ (对应的太阳夹角分别为  $58^{\circ}$ 、 $67.45^{\circ}$ 、 $88.27^{\circ}$  和  $108.85^{\circ}$ ), 光栅材料为铜金属, 光栅占空比为 0.5, 不同光栅高度条件下, ARR 指标值随光栅周期的变化情况。ARR 值越大, 金属光栅抑制大气背景光的效果越明显。图 8 表明: 在不同相机的方位角条件下, 在对应光栅周期位置上, 随着光栅高度  $h$  增加, ARR 值呈增大趋势, ARR 极大值在  $h=250\sim 300\text{ nm}$  时趋于饱和状态, 光栅周期取得理想值的大致范围为  $200\sim 340\text{ nm}$ 。

### 3.3 光栅设计结果及其效能分析

图 9 是在大气能见度为 12 km, 场景距离为 6 km, 太阳的方位角为  $0^{\circ}$ , 太阳的高度角为  $60^{\circ}$ , 相机高度角为  $2^{\circ}$ , 同时分别取相机的方位角  $\phi_v$  为  $0^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$ 、 $90^{\circ}$  和  $135^{\circ}$ (对应的太阳夹角分别为  $58^{\circ}$ 、 $67.45^{\circ}$ 、 $88.27^{\circ}$  和  $108.85^{\circ}$ ), 光栅材料为铜金属, 不同光栅周期和高度条件下, ARR 指标值随光栅占空比变化的情况。

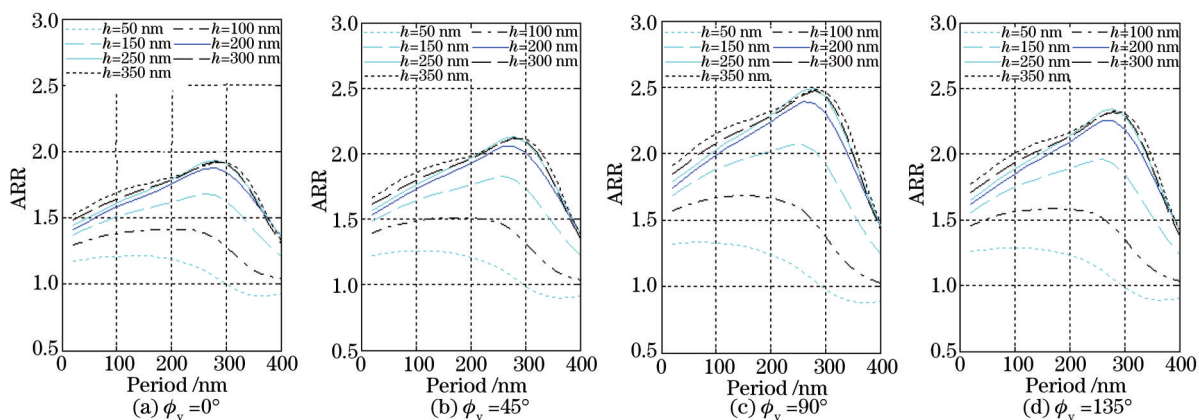


图 8 在远景成像条件下 ARR 随着光栅周期和高度的变化情况 ( $c=0.5 d$ )

Fig.8 ARR changing with grating periods and thicknesses under different outdoor conditions ( $c=0.5 d$ )

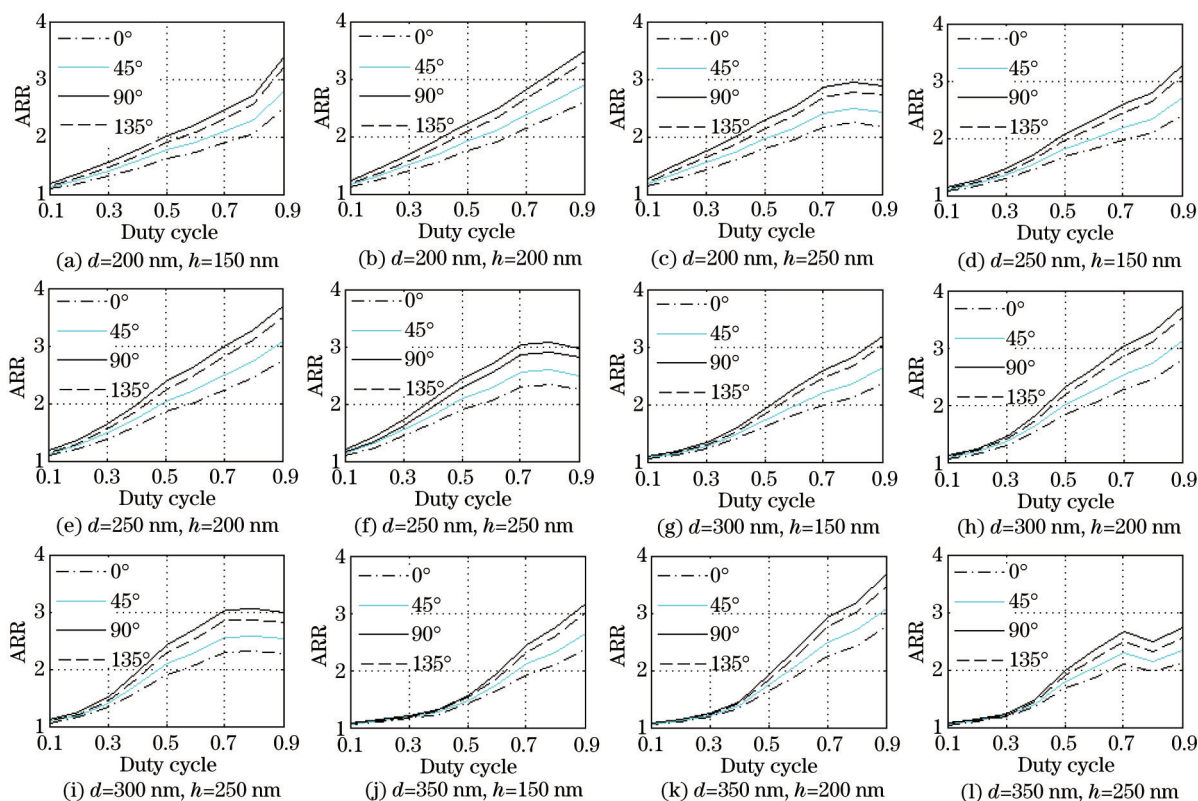


图 9 在不同周期和高度条件下 ARR 随着光栅占空比的变化情况

Fig.9 ARR changing with the duty cycle of gratings under condition of different grating periods and heights

图 9(a)~(l)均表明随着光栅占空比增大,ARR 值变大,WG 偏振片抑制大气背景光的效能提高。光栅占空比越大(特别是大于 0.5 以上)、周期越小、高度尺寸越大,光栅制备越困难。结合目前微纳米加工的技术现状,本文取占空比为 0.5。图 9 中,在占空比为 0.5 的位置上,3 种光栅结构参数组合( $d=250$  nm,  $h=200$  nm;  $d=250$  nm,  $h=250$  nm;  $d=300$  nm,  $h=250$  nm)均取得较高的 ARR 值。在偏振片的基底材料、光栅材料及占空比确定的条件下,光栅制备的难易程度通常取决于光栅的高度与周期之比,比值越高,加工难度越大。因此,本设计优先选用  $d=250$  nm、 $h=200$  nm 的光栅结构。至此,结合微纳米加工的技术工艺,设计了面向大气背景光抑制的一维矩形 WG 偏振片:光栅结构为一维矩形,光栅材料为铜金属,基底材料是折射率为 1.5 的二氧化硅,占空比为 0.5,周期为 250 nm,高度为 200 nm。

## 4 结 论

以提高光电成像系统对抗大气干扰能力为应用背景,将严格耦合波理论和偏振滤波抑制大气背景光的

效能计算模型相结合,提出了面向大气背景光抑制的金属光栅偏振片效能表征方法。借助于该方法,计算分析了一维矩形WG偏振片的大气背景光抑制效能,计算结果表明, :1) WG偏振片采用金、铜材料抑制大气背景光的效能优于银、铝和铬金属;2) 随着线栅高度的增加,WG偏振片抑制大气背景光的效能提高,较优的线栅高度为200 nm以上;3) 较优的线栅周期范围为200~300 nm;4) 随着线栅占空比增大,WG偏振片抑制大气背景光的效能提高;5) 结合光栅制备工艺,设计了一维矩形WG偏振片的光栅参数,光栅材料为铜金属,基底材料为折射率等于1.5的二氧化硅,占空比为0.5,周期为250 nm,高度为200 nm。将大气偏振辐射实时探测与WG偏振成像技术相结合,进一步提高大气干扰抑制水平值得深入研究。

## 参 考 文 献

- 1 Fang S, Xia X S, Huo X, *et al.*. Image dehazing using polarization effects of objects and airlight[J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19523–19537.
- 2 Zhang Renbin, Wang Lingmei, Gao Jun, *et al.*. The effect of observation geometry on polarized skylight spectrum[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(3): 700–705.  
张仁斌,王玲妹,高 隽,等. 观测几何对大气偏振光谱的影响. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(3): 700–705.
- 3 Zhang Ruijin, Xian Hao, Rao Changhui, *et al.*. Study on effect of polarization filter for suppressing sky background light in daytime[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0501003.  
张锐进,鲜 浩,饶长辉,等. 偏振滤波白天抑制天光背景作用分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0501003.
- 4 Asano K, Yokoyama S, Kemmochi A, *et al.*. Fabrication and characterization of a deep ultraviolet wire grid polarizer with a chromium-oxide subwavelength grating[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(13): 2942–2948.
- 5 Yamada I, Yamashita N, Einishi T, *et al.*. Modeling and imprint fabrication of an infrared wire-grid polarizer with an antireflection grating structure[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 64(3): 13–17.
- 6 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.
- 7 Schnabel B, Kley E B, Wyrowski F. Study on polarizing visible light by subwavelength-period metal-stripe gratings[J]. *Optical Engineering*, 1999, 38(2): 220–226.
- 8 Zhang Zhigang, Dong Fengliang, Zhang Qingchuan, *et al.*. Fabrication of pixelated polarizer array and its application in polarization enhancement[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(18): 184204.  
张志刚,董凤良,张青川,等. 像素偏振片阵列制备及其在偏振图像增强中的应用[J]. *物理学报*, 2014, 63(18): 184204.
- 9 Namer E, Shwartz S, Schechner Y Y. Skyless polarimetric calibration and visibility enhancement[J]. *Optics Express*, 2009, 17(2): 472–493.
- 10 Feng B, Shi Z L, Ding Q H, *et al.*. Computation for polarizer's optimal rotation angle on airborne optical platform[C]. *International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2011 International Society for Optics and Photonics*, 2011: 81941E.
- 11 Feng Bin, Shi Zelin, Ai Rui, *et al.*. A new computational model for performance of airlight rejection utilizing polarization filtering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0401003.  
冯 斌,史泽林,艾 锐,等. 偏振滤波抑制大气背景光的性能计算模型[J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 0401003.
- 12 Preetham A J, Shirley P, Smits B. A practical analytic model for daylight[C]. *Proceedings of ACM SIGGRAPH*, 1999: 91–100.
- 13 Preetham A J. Modeling skylight and aerial perspective[C]. *Proceeding of ACM SIGGRAPH*, 2003.
- 14 Bird R, Riordan C. Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the earth's surface for cloudless atmospheres[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2010, 25(1): 87–97.
- 15 NASA. ASTER Spectral Library[OL]. <http://speclib.jpl.nasa.gov>. 2008.
- 16 Feng Bin, Shi Zelin, Ai Rui, *et al.*. Computational model for polarization degree of airlight under condition of near-horizontal observation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 704–712.  
冯 斌,史泽林,艾 锐,等. 近水平观测条件下大气背景光偏振度的计算模型[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(3): 704–712.
- 17 Moharam M G, Gaylord T K. Rigorous coupled-wave analysis of metallic surface-relief gratings[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1986, 3(11): 1780–1787.
- 18 Zhang X, Qiu Y, Chen H, *et al.*. Design of fused-silica transmission gratings for orthogonal polarizing beam combiners[J]. *Optics Communications*, 2014, 333: 75–79.

栏目编辑: 史 敏