

亚波长金属线栅的设计、制备及偏振成像实验研究*

康果果^{1)†} 谭峤峰¹⁾ 陈伟力³⁾ 李群庆²⁾ 金伟其³⁾ 金国藩¹⁾

1) (清华大学精密测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084)

2) (清华大学清华-富士康纳米科技研究中心, 北京 100084)

3) (北京理工大学光电学院, 北京 100081)

(2009年7月13日收到; 2010年3月18日收到修改稿)

针对红外偏振成像系统, 运用等效介质理论, 在氟化钙基底上设计了周期为 200 nm, 深度为 100 nm 的金属铝栅. 模拟计算结果表明, 设计的金属铝栅在中红外(3—5 μm) 和远红外(8—12 μm) 双波段范围内, 以及 $\pm 20^\circ$ 的视场范围内能够提供大于 35dB 的消光比. 利用电子束曝光、反应离子束刻蚀、等离子去胶等工艺完成了金属铝栅的制作. 将金属铝栅放在中波红外热像仪前, 得到了目标轮廓清晰的偏振图像.

关键词: 亚波长衍射光栅, 偏振成像, 等效介质理论

PACS: 42.79.-e, 42.79.Ci, 42.25.Ja, 42.30.Va

1. 引言

偏振信息是不同于强度的另一种表征物体的信息, 不同物体或同一物体的不同状态所反射、辐射光波的偏振态存在着显著的差异^[1]. 成像过程中, 利用目标和背景光波的偏振态差异, 可以得到一幅对比度极高的偏振图像, 因此, 探测景物光波偏振态的成像技术即为偏振成像. 与传统的强度图像和红外热图像相比, 红外偏振图像不仅具有较高的对比度, 而且能够突显出目标物体的轮廓特征, 在军事伪装领域有着十分广泛的应用前景.

偏振成像系统中, 调制入射光波偏振态的偏振片是极为重要的器件. 与传统的偏振器件^[2] (偏振棱镜, 二向色性薄膜偏振片等) 相比, 亚波长金属线栅不仅结构紧凑, 易于集成, 而且具有较宽的光谱和视场范围, 较高的透过率和消光比, 十分适用于偏振成像系统. 笔者首次将金属的“趋肤深度”引入线栅设计过程, 设计了同时适用于中红外(3—5 μm) 和远红外(8—12 μm) 双波段的亚波长金属线栅, 并利用电子束曝光、反应离子束刻蚀以及等离子去胶等微加工工艺在氟化钙基底上制作了周

期为 200 nm, 占空比为 0.5, 深度为 100 nm 的金属铝栅. 中红外、远红外或中远红外双波热像仪配备了该金属线栅, 均可对场景进行偏振成像.

2. 金属线栅偏振特性解释

亚波长金属线栅^[3] 是指在透明基底上分布着的周期远小于入射光波长的金属栅条, 如图 1(a) 所示, 当偏振方向平行于栅条的 TE 偏振光入射到金属表面时, 将引起电子沿栅条方向自由振荡, TE 偏振光被金属栅条反射; 对于偏振方向垂直于栅条的 TM 偏振光, 由于栅条线宽远小于入射光波波长, 该方向上的电子振荡受到限制, TM 偏振光将直接透过. 因此, 分别如图 1(b), (c) 所示, 对于 TE 光, 栅条等效于一金属层, 光波被反射; 而对于 TM 光, 栅条则等效于一介质层, 光波能顺利通过.

当亚波长金属线栅的周期远小于入射光波长时, 还可运用等效介质理论^[4] 解释其偏振特性. 金属栅条的折射率可写成

$$n_m = n + ik, \quad (1)$$

其中虚部 k 为消光系数, k 值越大, 表示金属对入射光的反射、吸收率就越大. 根据等效介质折射率的

* 国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号:2007CB935303 和 2007CB935301)资助的课题.

† E-mail: kangguo@ mail. tsinghua. edu. cn

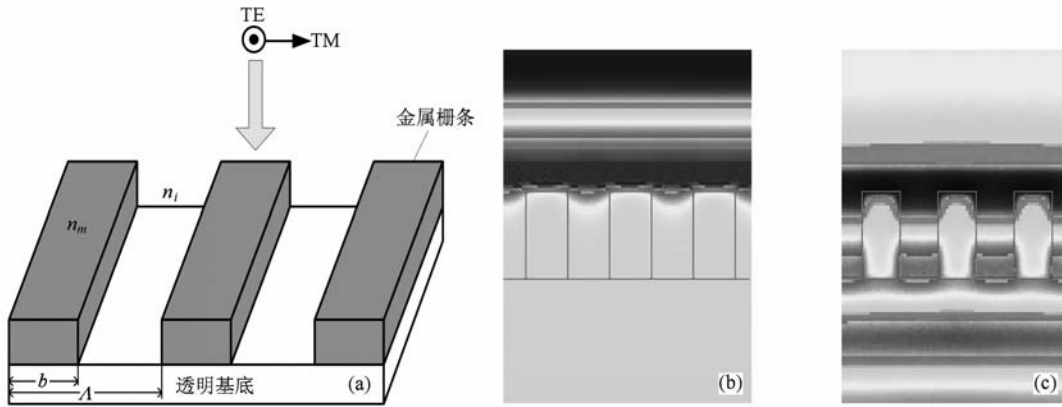


图1 金属线栅偏振选通 (a) 线栅结构;(b) TE 光场分布;(c) TM 光场分布

零级近似展开式,金属线栅对 TE, TM 光的等效折射率分别为

$$n_{TE} = [f(n + ik)^2 + (1 - f)n_i^2]^{1/2}, \quad (2)$$

$$n_{TM} = [f(n + ik)^{-2} + (1 - f)n_i^{-2}]^{-1/2}, \quad (3)$$

式中 $f = b/\Lambda$ 为线栅占空比, n_i 为空气折射率. 由于绝大多数金属材料的折射率在红外波段恒有

$$\min(n, k) \gg n_i, \quad (4)$$

因此,由(2),(3)式可知,金属折射率 $n_m = n + ik$ 和空气折射率 n_i 分别在 n_{TE} 和 n_{TM} 中占主导地位,线栅对 TE 光表现出金属属性,而对 TM 光则接近于一介质层. 图 2 是 TE, TM 偏振光入射时,不同金属材料

等效折射率的实、虚部在红外波段随波长变化的关系. 如图 2(b) 所示,不同材料栅条 n_{TE} 的虚部均具有较大值,金属线栅对 TE 光反射和吸收;图 2(d) 中,不同材料栅条 n_{TM} 的虚部数值均在 10^{-5} 量级上,可忽略不计,金属线栅对 TM 光等效于一折射率约为 1.4 的介质层.

3. 双波段金属线栅设计

用于红外偏振成像系统的金属线栅应满足三个条件:1) 消色差,在中红外(3—5 μm)和远红外

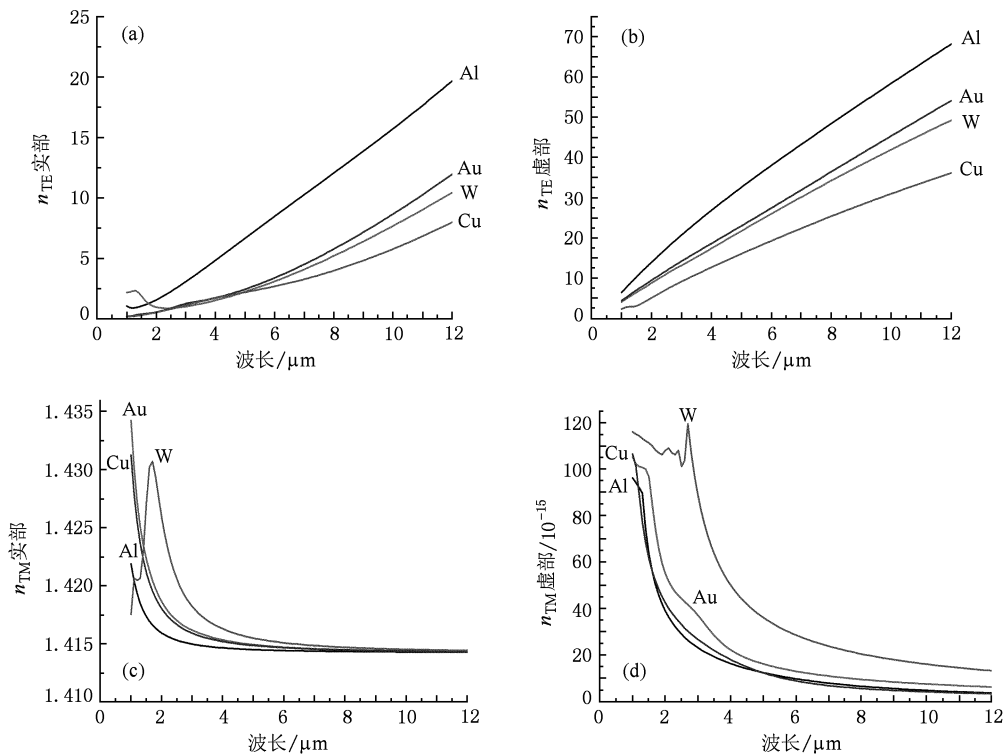


图2 金属栅条等效折射率随波长变化关系 (a) n_{TE} 实部;(b) n_{TE} 虚部;(c) n_{TM} 实部;(d) n_{TM} 虚部

(8—12 μm) 双波段范围内,线栅提供的消光比应大于设计阈值. 2) 无多级衍射,即线栅只有零级的透射或反射光,以避免多级衍射光所造成的“鬼像”干扰. 3) 对入射角度不敏感,由于红外热像仪具有一定的视场范围,这就要求线栅在一定的入射角度范围内仍能保持一定的消光比. 决定金属线栅性能最主要的两个参数为线栅周期和金属层深度. 红外偏振成像系统中线栅的设计就是在目前微细加工能力范围内,优化线栅的参数组合,使其能够同时满足上述三个条件.

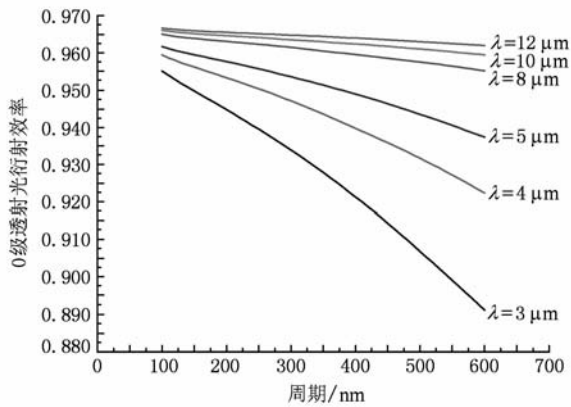


图3 TM 零级透射光衍射效率随周期的变化关系(金属铝栅的占空比 $f=0.5$, 栅层厚度 $h=100$ nm, 光线正入射)

线栅周期与入射光波长的对比关系决定了线栅的衍射级次. 当周期与波长的比值小于某一阈值时,线栅只有零级衍射波,可直接用于成像系统. 对于亚波长金属线栅,衍射光波的衍射级次和衍射角满足光栅方程^[5]

$$n \sin \theta_m + n_i \sin \theta_i = m \frac{\lambda}{\Lambda}, \quad (5)$$

其中, m 为衍射级次, θ_m 为对应的衍射角. 线栅只有零级透射光的临界条件为 1 级光对应的衍射角 $\theta_m = \pi/2$, (5) 式可变换为

$$\frac{\Lambda}{\lambda} = \frac{1}{n + n_i \sin \theta_i}, \quad (6)$$

因此,对于任意入射角,当线栅的周期满足 $\Lambda \leq \frac{\lambda}{n + n_i}$ 时,线栅无多级衍射,而只有零级透射光. 对于中红外(3—5 μm)和远红外(8—12 μm)双波段,经计算,周期的取值范围应满足 $\Lambda \leq 600$ nm. 图3是不同波长 TM 透射光的衍射效率随周期的变化关系. 为了获得更高的光线透过率,线栅的周期应越小越好,结合目前的微细加工能力,当选取线栅的周期为 $\Lambda = 200$ nm 时,能够保证中、远红外波段, TM 透

射光的衍射效率 $\eta \geq 94.5\%$.

前面提到,亚波长金属线栅对于 TE 光相当于一金属层. TE 光入射到金属层后将有一个“趋肤深度” d (即电磁波经过深度 d 后,其强度降低为原来的 $1/e$),为了使进入金属层的 TE 光能够被尽可能多的吸收,线栅的金属层深度 h 应数倍于 d . 下面对光波在金属中的“趋肤深度” d 进行理论推导.

电磁波在物质中传播时应服从波动微分方程^[6]

$$\nabla^2 E = \sigma \mu \frac{\partial E}{\partial t} + \varepsilon \mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}, \quad (7)$$

透明介质的电导率 $\sigma = 0$, 因此对于透明介质, (7) 式可写为

$$\nabla^2 E = \varepsilon \mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}. \quad (8)$$

由于金属的电导率 $\sigma \neq 0$, (7) 式中电场强度 E 对时间的一阶导数决定了金属和透明介质的差别. 把波函数中随时间变化的部份单独写出

$$E(r, t) = E_1(r) \exp(-j\omega t). \quad (9)$$

此时,电场对时间的一、二阶导数间有下述关系:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{j}{\omega} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}. \quad (10)$$

将(10)式代入(7)式,得到电磁波在金属中传播应服从的波动微分方程为

$$\nabla^2 E = \mu \left(\varepsilon + j \frac{\sigma}{\omega} \right) \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}. \quad (11)$$

可见,除了出现复系数外,该方程与透明介质中的波动微分方程(8)式相似. 如果把电磁波的空间参量和位相速度扩展到复数邻域,则有

$$\hat{\varepsilon} = \varepsilon + j \frac{\sigma}{\omega}, \quad (12)$$

$$\frac{1}{\hat{\nu}^2} = \mu \left(\varepsilon + j \frac{\sigma}{\omega} \right) = \mu \hat{\varepsilon}, \quad (13)$$

式中 $\hat{\varepsilon}$ 和 $\hat{\nu}$ 分别表示“复介电常数”和“复位相速度”. 仍然仿照透明介质情形中的关系式,光波在金属中传播的“复传播数” \hat{k} 为

$$\hat{k} = \frac{\omega}{\hat{\nu}} = k_R + jk_I. \quad (14)$$

由此,光波在金属中传播时,其波函数可写为

$$\begin{aligned} E(r, t) &= E_0 \exp\{j[\hat{k}(s \cdot r) - \omega t]\} \\ &= E_0 \exp[-k_I(s \cdot r)] \\ &\quad \times \exp\{j[k_R(s \cdot r) - \omega t]\}. \end{aligned} \quad (15)$$

由此可见,金属内的电磁波是衰减波,其衰减规律为

$$I(r) = I_0 \exp[-2k_I(s \cdot r)]. \quad (16)$$

根据“趋肤深度”的定义

$$\frac{I(d)}{I_0} = \frac{1}{e}, \quad (17)$$

可得

$$d = \frac{1}{2k_i}. \quad (18)$$

由(13),(14)式得“趋肤深度” d 与光波时间圆频率的关系为

$$d = \frac{1}{\sqrt{2\omega\sigma\mu}}. \quad (19)$$

图4(a)为中、远红外波段的光波在金属铝中的“趋肤深度” d ,图4(b)为栅层厚度 h 取 d 的不同倍数时,TE光的透过率在中、远红外波段随波长的变化关系.从图中可以看出,在中、远红外波段,TE光的透过率随着栅层厚度的增加而减小;当 $h = 5d \approx 100 \text{ nm}$ 时,TE光的平均透过率仅为0.2‰,表现出十分优秀的偏振选通性.

定义金属线栅的消光比(dB)为TM,TE光的透过率之比,即

$$C = 10 \times \log_{10}\left(\frac{\eta_{TM}}{\eta_{TE}}\right). \quad (20)$$

如图5所示,对于周期 $\Lambda = 200 \text{ nm}$,栅层厚度 $h = 100 \text{ nm}$,占空比 $f = 0.5$ 的金属铝栅,我们利用严格耦合波理论计算了铝栅的消光比在中、远红外波段随波长、入射角度的变化关系.如果以目前公认的消光比 $C = 20 \text{ dB}$ 作为阈值(对应于图5中的直线),设计的金属铝栅在中、远红外双波段及 $\pm 20^\circ$ 的入射角度范围内,能够提供 $C > 35 \text{ dB}$ 的消光比,具有很强的偏振性,可作为性能良好的偏振器用于红外偏振成像系统.

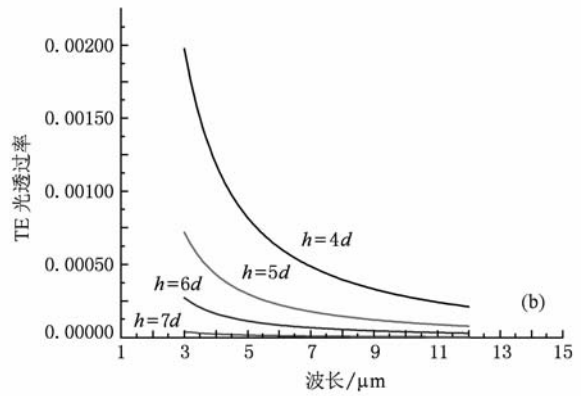
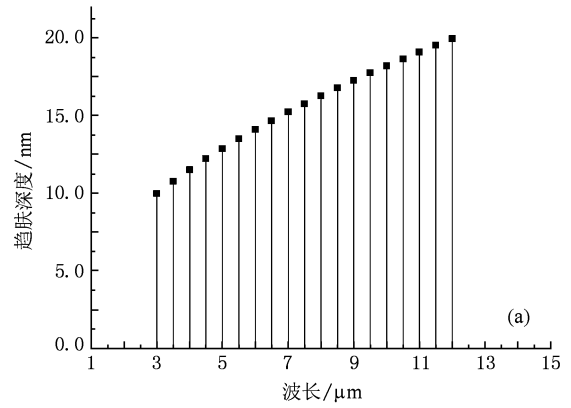


图4 栅层厚度的选取 (a)中、远红外TE光波在金属铝层中的“趋肤深度” d ; (b)栅层厚度取 d 的不同倍数时,TE光透过率随波长变化关系

4. 金属线栅制作及红外偏振成像实验

通过电子束曝光、反应离子束刻蚀及干法去胶等技术^{7-9]},在氟化钙基底上制作了 $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ 见方的金属铝栅样品,其制作工艺如图6所示.

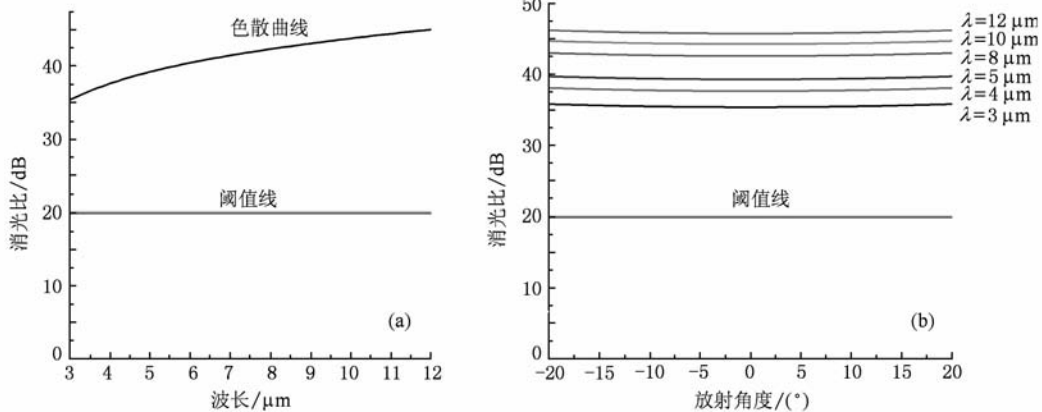


图5 金属线栅偏振特性 (a)消光比光谱特性曲线;(b)消光比角度特性曲线

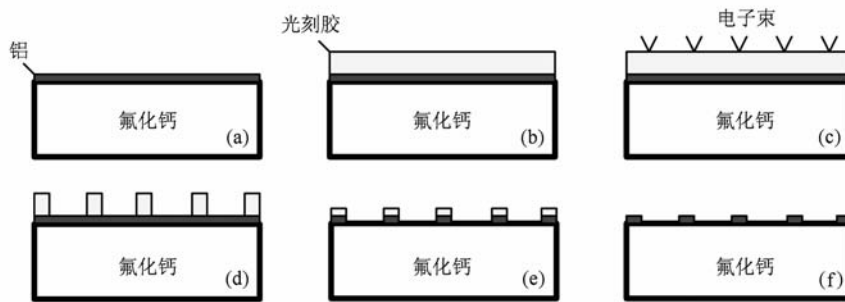


图6 金属铝栅制作工艺 (a) 蒸镀铝层;(b) 涂布光刻胶;(c) 电子束曝光;(d) 显影;(e) 反应离子束刻蚀;(f) 去胶

首先在氟化钙基底上蒸镀一层厚度为 100 nm 的金属铝层;随后再在铝层上均匀涂布一层厚度为 330 nm 的光刻(光刻胶型号:ZEP520、甩胶速率:5500 r/min、曝光剂量:240 μc),胶层厚度正比于光刻胶与金属铝的刻蚀速率比值;接下来通过电子束曝光(电子束直写设备型号:Jeol 6300)在光刻胶上直写出栅条结构;显影后,利用反应离子束刻蚀(刻

蚀气体采用 Cl_2 与 BCl_3 的混合气体、气压:2 Pa、刻蚀时间:50 s)将栅条结构转移至铝层上;最后在去胶机中用氧等离子体去除掉多余的光刻胶,完成样品的制作. 金属铝栅的实物图与其局部正面电镜扫描图分别如图 7(a),(b)所示. 由于采用了电子束,铝栅结构的实际周期与 200 nm 的设计值十分符合.

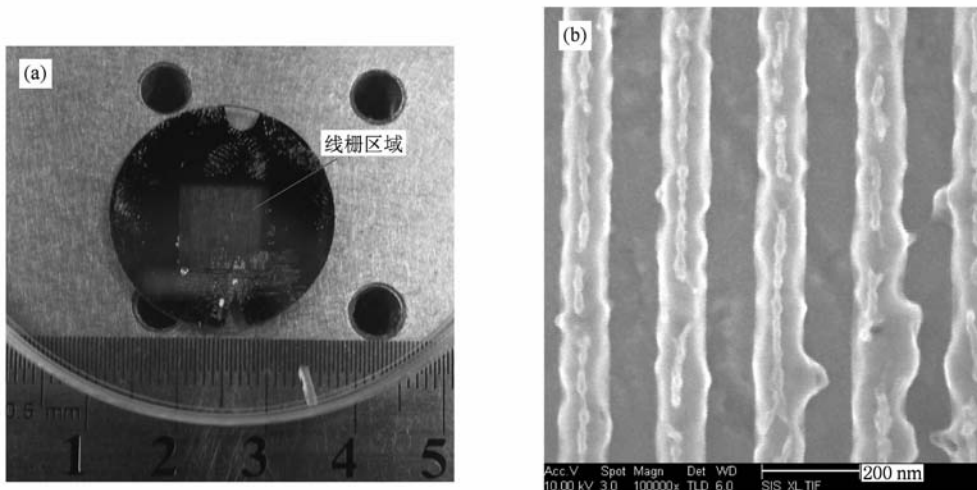


图7 金属铝栅 (a) 实物图;(b) 局部电镜扫描图

我们将制作的金属铝栅放在一中红外热像仪镜头前,对一侧壁刻有凹槽并且盛满热水的玻璃水杯进行了偏振成像实验.图 8(a)一(d)分别为水杯的可见光图像、红外图像、红外偏振图像和偏振轮廓图像.如图 8(b)所示,由于热水的加热作用,水杯凹槽区域的温度(目标温度)与水温(背景温度)一致,热像仪无法将凹槽从周围的热背景中区分出来,凹槽“隐身”于红外图像中;虽然凹槽区域和热水具有相同的温度,但二者辐射光波的偏振态却有着显著的差异,因此,如图 8(c)所示,二者辐射的不

同偏振态的光波经过金属铝栅的偏振选通后,进入热像仪的光波能量将产生差别,凹槽在红外偏振图像中“显露”出来.为了进一步提高对比度,凸显目标轮廓,通过旋转金属铝栅,获取了偏振透光方向分别为 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 135^\circ$ 六幅图像,通过图像融合消除了亮背景(热水),得到了如图 8(d)所示的清晰偏振轮廓图像.

上述红外偏振成像实验不仅测试了所研制金属铝栅的偏振选通性,更为重要的是该实验还蕴含着红外隐身与红外防伪的基本思想.目前许多重

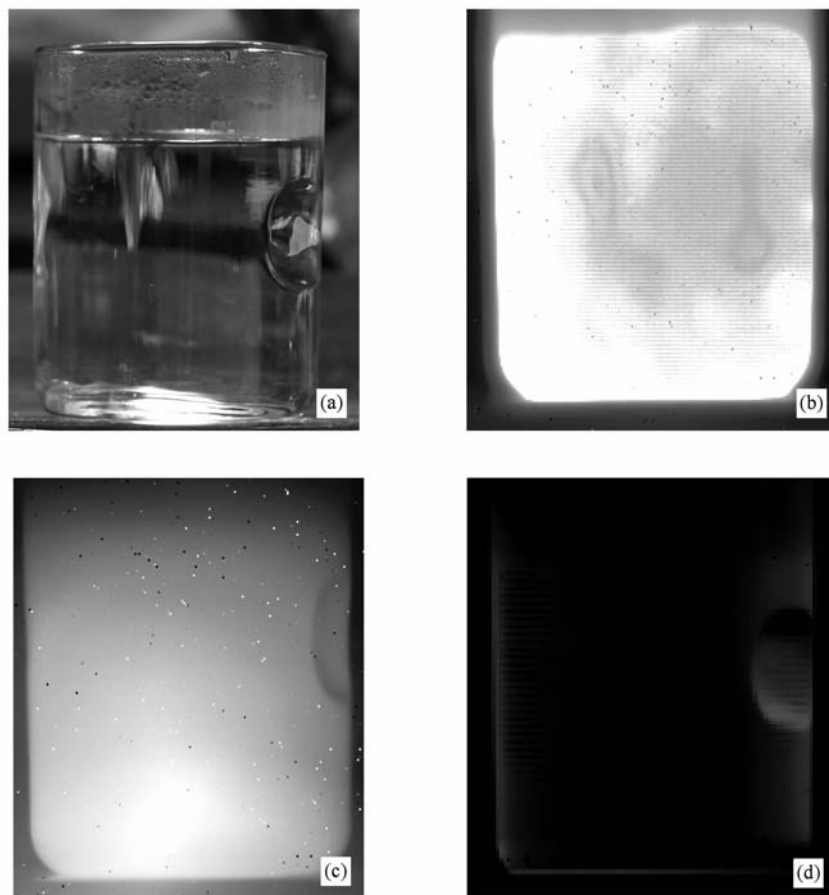


图8 红外偏振成像实验 (a) 可见光图像;(b) 红外图像;(c) 红外偏振图像;(d) 偏振轮廓图像

要的军事设施都隐藏于山体涵洞中,以涵洞口为例,对于做了形体、颜色伪装或夜间的涵洞口,可见光图像显然无法识别;通过精准的温控措施,使涵洞口的温度与周围山体温度一致,涵洞口将能实现红外隐身;而将红外偏振技术和图像融合技术结合起来,则可凸显涵洞口轮廓,为我方军事攻击提供清晰的目标图像.

5. 结 论

基于等效介质理论,定量地计算了金属栅条对 TM, TE 光波的等效折射率,解释了金属线栅的偏振

选通性. 通过栅条周期与衍射级次间的相互关系以及“趋肤深度”随 TE 透过率的变化关系,并根据实际的微细加工能力,对金属线栅的周期、栅层深度等参数进行了优化设计. 对于周期 $d = 200 \text{ nm}$, 栅层深度 $h = 100 \text{ nm}$, 占空比 $f = 0.5$ 的铝栅结构,矢量计算结果表明,在中红外 ($3\text{--}5 \text{ }\mu\text{m}$) 和远红外 ($8\text{--}12 \text{ }\mu\text{m}$) 双波段范围内,以及 $\pm 20^\circ$ 的视场范围内能够提供大于 35 dB 的消光比,具有宽光谱、大角度特性. 利用电子束曝光、反应离子束刻蚀以及干法去胶等微细加工技术,制作了金属铝栅样品. 样品配合红外热像仪,得到了高对比度的目标偏振热像,有望在军事红外伪装邻域得到实际应用.

- [1] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, Shaw J A 2006 *Appl. Opt.* **45** 5453
 [2] Shen S, She J, Tao T 2005 *J. Opt. Soc. Am. A* **22** 961
 [3] Yamada I, Nishii J, Satio M 2008 *Opt. Lett.* **47** 4735

- [4] Richter I, Sun P C, Fainman Y 1995 *Appl. Opt.* **34** 2421
 [5] Zhang S W, Bayanheshig 2008 *Acta. Phys. Sin.* **57** 3486 (in Chinese) [张善文、巴音贺希格 2008 物理学报 **57** 3486]
 [6] Zhao D Z, Zhang H Y 1988 *Wave Optics* (Beijing: Astronautic

- Publishing House) p63 (in Chinese) [赵达尊, 张怀玉 1988 波动光学(北京:宇航出版社)第 63 页]
- [7] Ekberg M, Nikolajeff F, Larsson M, Hard S 1994 *Appl. Opt.* **33** 103
- [8] Zhu X L, Xu Y G, Yang S 2007 *Opt Express.* **15** 16546
- [9] Fang L, Du J L, Guo X W, Wang J Q, Zhang Z Y, Luo X G, Du C L 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2499

Design and fabrication of sub-wavelength metal wire-grid and its application to experimental study of polarimetric imaging*

Kang Guo-Guo^{1)†} Tan Qiao-Feng¹⁾ Chen Wei-Li³⁾ Li Qun-Qing²⁾ Jin Wei-Qi³⁾ Jin Guo-Fan¹⁾

1) (State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2) (Tsinghua-Foxconn Nanotechnology Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

3) (School of Optoelectronic, Beijing Institute of Technology University, Beijing 100081, China)

(Received 13 July 2009; revised manuscript received 18 March 2010)

Abstract

Metal wire-grid whose period is far less than the illuminating wavelength exhibits strong polarization selectivity within a large field of view over a wide wave length range. Thus it could be used as the polarization-controller in the polarimetric imaging system. For infrared polarimetric imaging system, an aluminum wire-grid on the CaF substrate with period of 200nm and depth of 100nm was designed based on effective medium theory. The calculation results demonstrate that the designed wire-grid has the extinction ratio larger than 35 dB within a field of view $\pm 20^\circ$ over both middle wave infrared (MWIR) (3—5 μm) and long wave infrared (LWIR) (8—12 μm). The aluminum wire-grid was fabricated by electron beam lithography, reactive ion etching and plasma stripping. A clear-cut polarimetric image was obtained when wire-grid was placed in front of a MWIR thermal infrared imager.

Keywords: sub-wavelength diffractive grating, polarimetric imaging, effective medium theory

PACS: 42.79.-e, 42.79.Ci, 42.25.Ja, 42.30.Va

* Project supported by the National 973 (Grant Nos. 2007CB935303, 2007CB935301).

† E-mail: kangguo@ mail. tsinghua. edu. cn