

基于等离激元效应的近红外偏振滤光片的模拟研究

陈雪娇, 蔡红星*, 任 玉, 周建伟, 周建伟, 张 森

长春理工大学, 吉林省光谱探测科学与技术高校重点实验室, 吉林 长春

收稿日期: 2022年3月1日; 录用日期: 2022年4月2日; 发布日期: 2022年4月8日

摘 要

本文基于表面等离激元(Surface Plasmons, SPs)理论, 结合有限时域差分法(Finite Difference Time Domain method, FDTD)对周期性亚波长金属光栅的偏振特性进行了模拟研究, 并利用等效介质理论分析了亚波长光栅产生偏振的原因, 深入分析入射波长在0.8~1.7 μm 内, 亚波长金属光栅的周期、占空比、厚度以及金属材料对透射光偏振特性的影响。结果表明Al和Au的共同之处是都可以对金属光栅产生偏振调控, 不同之处是Al对于消光比的调控较明显、Au对于透过率的调控较明显。此外亚波长金属光栅的周期与透过率、消光比均成正比; 占空比与透射率成正比, 与消光比成反比; 光栅厚度对消光比的影响较明显。本研究为偏振光谱成像芯片的核心部件近红外偏振滤光膜系的应用奠定了基础。

关键词

近红外光谱, 光谱偏振滤光, 亚波长周期光栅, 表面等离激元

Simulation Study of Near-Infrared Polarizing Filter Based on Plasmon Effect

Xuejiao Chen, Hongxing Cai*, Yu Ren, Jianwei Zhou, Sen Zhang

Jilin Key Laboratory of Spectral Detection Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Mar. 1st, 2022; accepted: Apr. 2nd, 2022; published: Apr. 8th, 2022

Abstract

Based on the theory of Surface Plasmons (SPs), this paper combines the Finite Difference Time

*通讯作者。

文章引用: 陈雪娇, 蔡红星, 任玉, 周建伟, 周建伟, 张森. 基于等离激元效应的近红外偏振滤光片的模拟研究[J]. 传感器技术与应用, 2022, 10(2): 116-127. DOI: 10.12677/jsta.2022.102015

Domain method (FDTD) to simulate the polarization characteristics of periodic sub-wavelength metal gratings, and uses the equivalent medium theory. Explain the reasons for the polarization of the sub-wavelength grating, and analyze in depth the influence of the period, duty cycle, thickness and metal materials of the sub-wavelength metal grating on the polarization characteristics of the transmitted light within the incident wavelength of 0.8~1.7 μm . The results show that the commonality of Al and Au is that both can control the polarization of the metal grating. The difference is that Al controls the extinction ratio more obviously, and Au controls the transmittance more obviously. In addition, the period of the sub-wavelength metal grating is directly proportional to the transmittance and extinction ratio; the duty cycle is directly proportional to the transmittance and inversely proportional to the extinction ratio; the thickness of the grating has a more obvious influence on the extinction ratio. This research lays the foundation for the application of the near-infrared polarization filter film, the core component of the polarization spectrum imaging chip.

Keywords

Near-Infrared Spectroscopy, Spectral Polarization Filter, Subwavelength Periodic Grating, Surface Plasmon

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近红外光谱技术是一门新型技术，它可以看到肉眼以及普通相机看不到光谱维度信息。随着近红外光谱技术，主要在卫星遥感[1]，对地勘测[2]，生物医疗[3]中的快速发展，但某些极端天气或特殊情况下无法对目标准确识别。由 Fresnel 公式可知，每个物体在反射、透射以及散射电磁波时，都会产生不同的偏振信息，这与物体本身的性质有着密不可分的关系。因此通过对近红外光谱成像场景中偏振信号的探测，不仅能够增强图像对比度，而且可以提升系统对目标探测与识别的能力。原有的偏振成像技术一般是快速转动偏振片，来获得物体各个偏振方向的偏振信息[4]，但是这类方法只能探测到缓速运动和静止的物体，对目标在同一时刻、不同偏振方向的信息是没有办法立即得到的。同时此类方法要求系统具有极高的稳固性[5] [6] [7]。由于微纳加工技术的不断进步，亚波长金属光栅偏振片的出现解决了这个问题，同时亚波长金属光栅偏振器也逐渐得到广泛应用，并且其体积小、便于携带、偏振特性优良、易于集成等诸多优势。通过结合金属偏振光栅阵列与 CCD/CMOS 相机，同时获得多个偏振方向上的偏振信息。与传统的偏振成像技术相比体积大幅减小，可以逐渐转为民用。

1997 年，H. Tamada [8]等选用石英基底，通过电子束直写方法和剥离技术制备出周期为 390 nm 的金属光栅。在入射波长为 780 nm 时，通过调整参数后，分别制备出高透过率金属铝光栅和高消光比金属铝光栅，其中前者透过率达到 80%以上，消光比达到 30，后者透过率在 50%以上，消光比为 1000。2018 年，Sony 公司在可见光成像之外的领域扩大了自己传感器技术的领导地位，他的第一个意义深远的偏振传感器是新一代的 IMX250MZR(单色)传感器[9]，在基于 Pregius 5.0MP IMX250 CMOS 传感器的光电二极管上方加入一层偏振片。四个不同角度的偏振片(90°, 45°, 135°, 0°)分别放置于单个像元上，每四个像元一组作为一个计算单元。这一创新的 4 像元块设计中，通过不同方向偏振器之间的关联能够计算偏振的程度和方向。偏振阵列位于芯片上而不是玻璃上，因为这样，芯片上的偏振器会更接近二极管从而产生

更高的消光比以及减少由错误的像素错误检测的偏振角度产生的串扰。2019年,朱旺、王兴泽等人将亚波长孔阵结构与 CMOS 传感器结合,成功制备出光谱成像芯片[10]。本文通过时域有限差分法,优化设计了一种亚波长金属光栅结构,分析光栅参数是如何影响偏振性能。不仅为光谱成像芯片增加了偏振功能,同时也有望降低光谱成像偏振芯片成本,为未来光谱成像偏振芯片的量产以及民用化提供理论依据。

2. 结构设计

为实现 0.8~1.7 μm 近红外光的偏振透射调制,本文设计了亚波长金属光栅,通过改变结构参数,对其偏振性能进行仿真。本文基于时域有限差分法(Finite Difference Time Domain method, FDTD),利用 FDTD Solution 软件[11]对亚波长金属光栅结构进行设计及优化。光栅结构的仿真模型如图 1 所示:

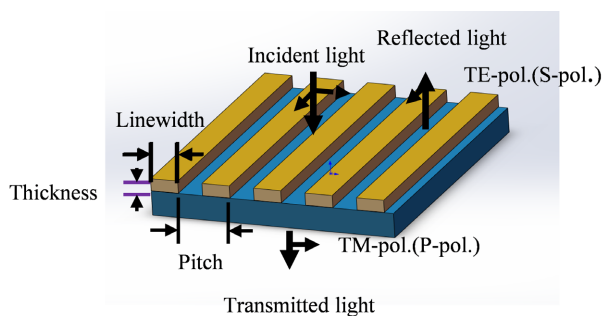


Figure 1. Subwavelength metal grating structure diagram
图 1. 亚波长金属光栅结构图

FDTD solutions 软件中主要仿真参数设置有:基底选择 SiO_2 ; 依照 Palik 的研究数据对金属的介电常数进行多系数拟合[12]; 在亚波长金属偏振光栅平面内,即 X Y 平面,边界条件采用周期边界(入射光正入射)或 Bloch 边界(入射光斜入射),用于仿真无限重复周期光栅阵列; 在亚波长金属偏振光栅的垂直方向 Z 轴,边界条件为完美匹配层(perfectly matched layers, PML),用于吸收反射和传输光子。入射光为线偏振平面波,波长范围是近红外工作谱段 0.8~1.7 μm 。

3. 透射及偏振分析

3.1. 亚波长金属光栅偏振原理

当入射波长远大于其光栅周期,此时的光栅被定义为亚波长光栅。Hertz 于 1888 年首次对亚波长金属光栅进行偏振特性实验[13],发现其对入射光的偏振状况十分敏感。此后,有关亚波长金属光栅的理论探究发展急速。亚波长金属光栅产生偏振的基本理论为 TE 偏振光引发金属线栅的电子而产生电流,从而导致 TE 偏振光反射,此时 TM 偏振光受到该方向上的空气间隙将金属线栅拦截而不能产生电流,所以 TM 波会透过线栅[14] [15]。亚波长金属光栅的透射及偏振特性效果由 TM 透过率与消光比评价,其中消光比定义为 $10 \cdot \log_{10}(T_{TM}/T_{TE})$ 即垂直于光栅的入射光通量与平行于光栅的入射光通量比值,如图 2 中 90° 与 0° 的透过率比值即为此时的消光比。

通常研究亚波长金属光栅的方法是等效介质理论,该理论认为,当入射波长远大于光栅结构周期时,入射光只发生零级透射和零级反射。这时,通过理论可知,可将光栅结构看作效果近似的各向异性的薄膜材料。通过转化后,便于对亚波长进行分析与设计研究。亚波长金属光栅的等效介质理论如下[16]。

TE 偏振光等效折射率。TE 光偏振方向与光栅夹角为 0° 时,当 TE 光入射到金属光栅偏振器上,通过麦克斯韦方程的边界条件可知,电场的切向量在不连续边界上为常数值。因此,在每个电解质层,电场矢量具备相同的值,因此在两个电介质区域,电位移矢量 D 分别为:

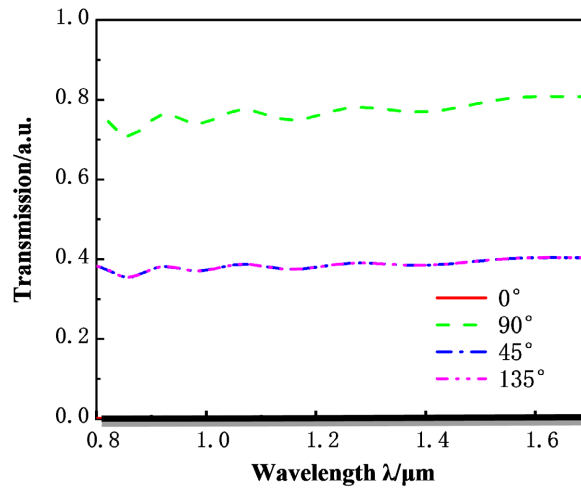


Figure 2. When the incident light is rotated by 0° , 90° , 45° , and 135° , the transmittance varies with wavelength

图 2. 入射光分别旋转 0° 、 90° 、 45° 、 135° 时, 透过率随波长变化

$$D_1 = \varepsilon_1 E \quad (1)$$

$$D_2 = \varepsilon_2 E \quad (2)$$

式中, ε_1 、 ε_2 分别表示光栅和周围环境的介电常数, E 为电场值。所以, 平均电位移为:

$$D = \frac{f_1 \varepsilon_1 E + f_2 \varepsilon_2 E}{f_1 + f_2} \quad (3)$$

其中, 光栅占空比用 f_1 表示, $f_1 + f_2 = 1$, 可以得出 TE 偏振光的等效介电常数 ε_{TE} , 可表示为:

$$\varepsilon_{TE} = \frac{D}{E} = \frac{f_1 \varepsilon_1 + f_2 \varepsilon_2}{f_1 + f_2} = f_1 \varepsilon_1 + (1 - f_1) \varepsilon_2 \quad (4)$$

因为折射率 $n = \sqrt{\varepsilon}$, 同时令占空比 $f = f_1$, 由此得出 TE 偏振的电场矢量的折射率:

$$n_{TE} = \sqrt{f n_1^2 + (1 - f) n_2^2} \quad (5)$$

TM 偏振光等效折射率。 TM 光偏振方向与光栅成 90° 时, 当 TM 光入射到金属光栅偏振器上, 通过麦克斯韦方程的边界条件可知, 电位移矢量 D 的分量在不连续边界上是连续的。因此, 在两个电解质区域内, D 是一个常数。每一个区域对应的电场矢量分别为:

$$E_1 = \frac{D}{\varepsilon_1} \quad (6)$$

$$E_2 = \frac{D}{\varepsilon_2} \quad (7)$$

平均电场矢量为:

$$E = \frac{f_1 \frac{D}{\varepsilon_1} + f_2 \frac{D}{\varepsilon_2}}{f_1 + f_2} \quad (8)$$

由此可知, TM 偏振光的等效介电常数 ε_{TM} 可以表示为:

$$\varepsilon_{TM} = \frac{D}{E} = \frac{(f_1 + f_2)\varepsilon_1\varepsilon_2}{f_1\varepsilon_2 + f_2\varepsilon_1} = \frac{\varepsilon_1\varepsilon_2}{f_1\varepsilon_2 + (1-f_1)\varepsilon_1} \quad (9)$$

由于折射率 $n = \sqrt{\varepsilon}$ ，并令占空比 $f = f_1$ ，可得 TM 偏振的电场矢量的折射率：

$$n_{TM} = \sqrt{\frac{n_1^2 n_2^2}{fn_2^2 + (1-f)n_1^2}} \quad (10)$$

金属材料的折射率通常为 $n_1 = n + ik$ 的形式，将金属折射率代入上述两式，分别得到

$$n_{TE} = \sqrt{f(n+ik)^2 + (1-f)n_2^2} \quad (11)$$

$$n_{TM} = \sqrt{\frac{(n+ik)^2 n_2^2}{fn_2^2 + (1-f)(n+ik)^2}} \quad (12)$$

通过式(11)、(12)可以得到光栅层的等效折射率 n_{TE} 、 n_{TM} 。对于 TE 偏振光，虚部较大且实部较小，其中光栅层效果相当于金属膜，因此大部分 TE 偏振光会被反射和吸收。而 TM 偏振光特性相反，实部比较大，虚部较小，光栅层被看作介质层，所以绝大多数分 TM 偏振光被透射。

3.2. 不同金属材料对偏振性能的影响

为了比较不同光栅材料对偏振透射性能影响，理论设计了 SiO₂ 衬底上，光栅周期 $P = 0.2 \mu\text{m}$ 、占空比 $F = 0.5$ 、厚度 $h = 0.1 \mu\text{m}$ 的亚波长金属光栅。金属材料分别选用 Au、Ag、Al 三种不同材料进行偏振光学模拟仿真。

三种材料的 TM 波透过率和消光比的模拟结果如图 3(a)、图 3(b)，三种金属的透过率和消光比均随着波长的增大而增大，图 3(a)是三种金属的透过率随波长的变化，当波长 $\lambda = 1.4 \mu\text{m}$ 时，Au、Ag、Al 三种金属的透过率分别为 87.6%、86.8%、85.2%，结果表明 Au 对 TM 波的透过效果较强；图 3(b)为三种金属的消光比随波长的变化，消光比是由公式 $10 \cdot \log_{10}(T_{TM}/T_{TE})$ 计算得出，当波长 $\lambda = 1.4 \mu\text{m}$ 时，Au、Ag、Al 三种金属的消光比分别为 161:1、213:1、1206:1，结果表明金属 Al 引起光栅较高的消光比，这是因为 Al 的虚部折射率大，趋肤深度小。

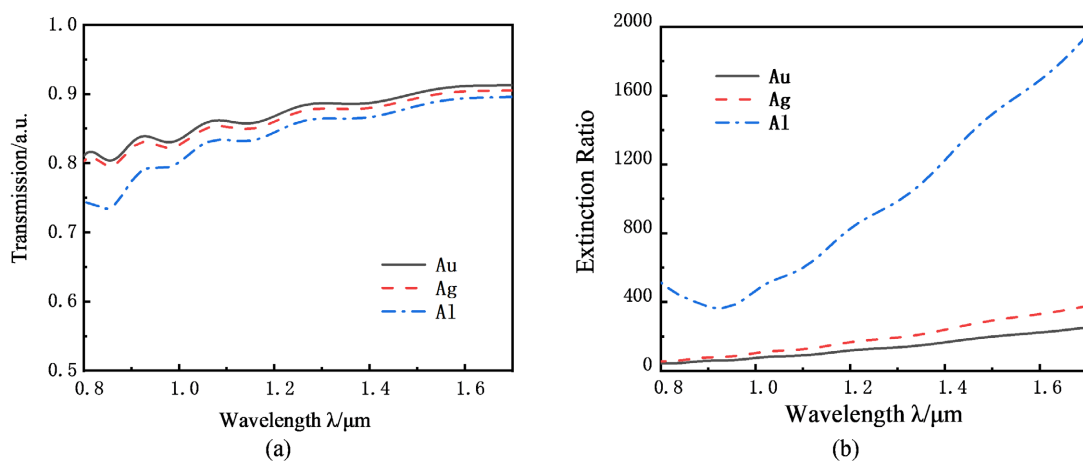


Figure 3. Under the same parameter conditions, the transmittance and extinction ratio of Au, Ag and Al vary with wavelength. (a) Transmittance varies with wavelength; (b) Extinction ratio varies with wavelength

图 3. 相同参数条件下，Au、Ag、Al 的透过率、消光比随波长变化；(a) 透过率随波长变化；(b) 消光比随波长变化

考虑 Al 暴露在空气中后, 会形成一层致密的氧化膜 Al_2O_3 , 可能会对金属光栅偏振性能产生一定影响, 现模拟 Al 在生成氧化膜后对偏振透射性能的影响。理论设计了在 Al 上生长一层 Al_2O_3 , 文献中报道的 Al_2O_3 厚度在 2~7 nm 之间变化[17], 此处假设在铝光栅的上表面有 0~7 nm 的 Al_2O_3 。如图 4(a)、图 4(b) 所示, 为亚波长 Al 光栅上覆盖 0~7 nm 的 Al_2O_3 后透过率和消光比随波长变化谱线。

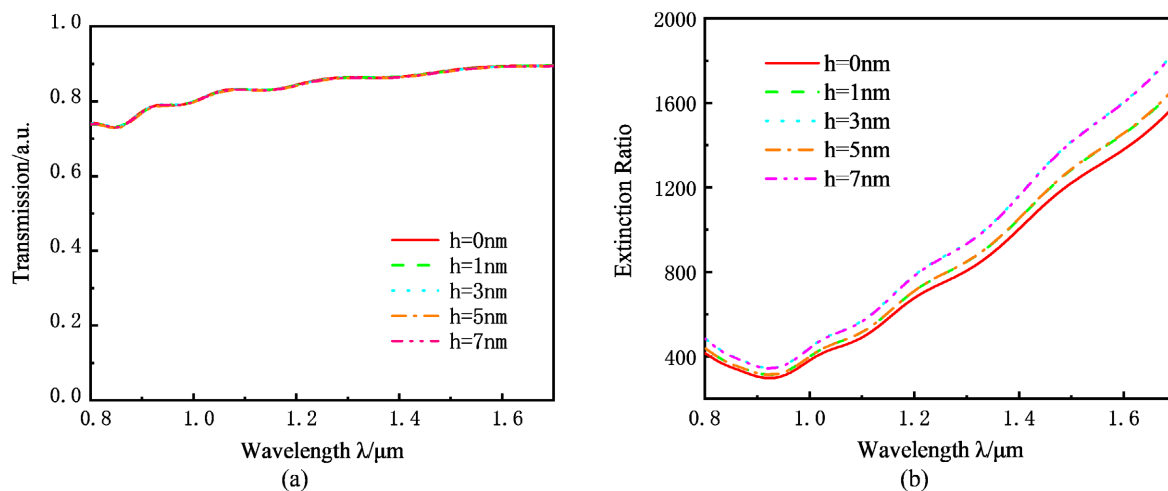


Figure 4. (a) Variation of transmittance with wavelength under different thicknesses of Al_2O_3 ; (b) Variation of extinction ratio with wavelength under different thicknesses of Al_2O_3

图 4. (a) 不同厚度的 Al_2O_3 下透过率随波长变化; (b) 不同厚度的 Al_2O_3 下消光比随波长变化

图 4(a)为不同厚度 Al_2O_3 下透过率随波长变化, 结果表明不同厚度的氧化层对透过率的影响较小。由图 4(b)为不同厚度 Al_2O_3 下消光比随波长变化可知, 在波长在 1.6 μm 时, 氧化膜从 0 nm 增大到 7 nm 的同时消光比从 1320:1 增大到 1562:1, 增长较小, 可忽略不计。所以有无氧化层对光学偏振性能变化趋势影响不大, 后文模拟 Al 光栅性能时均不考虑氧化层。接下来主要对金属材料 Al 和金属 Au 在相同参数范围内进行仿真模拟, 通过改变其他参量观察其偏振透射性能。

3.3. 光栅周期对偏振性能的影响

光栅周期和入射波长之间的关系是影响亚波长金属光栅偏振特性的主要因素。当周期与入射波长接近时, 有可能产生 Wood-Rayleigh 异常透射, 即当入射波长与入射角满足式(13)时, 某些级次的衍射光会由于所对应入射角为 90° 而处于传播波转换为倏逝波的临界状态, 反射率急剧增加, 从而带来透射极小。

$$\lambda_0 = \frac{p(n_d \pm \sin \theta)}{k} \quad (13)$$

式中, p 为光栅周期, n_d 为光栅基底折射率, k 为衍射级次, 当 $k=1$, $\lambda_0 = p(n_1 \pm \sin \theta)$ 时, 光栅的衍射光只存在零级衍射, 此时的周期称为临界周期。经过计算, 在波长 0.8~1.7 μm 时, 临界周期 $P_m = 0.5 \mu\text{m}$, 在接下来的仿真时, 周期最大设置为 0.5 μm ; 下面将对金属 Al 和金属 Au 两种不同材质的光栅分别仿真, 下图为改变周期对两种金属光栅透过率及消光比的影响。

图 5(a)、图 5(b)分别是金属 Al、Au 作为光栅的材料时, 改变光栅周期 P , 透过率随波长的变化。随着波长的增大, 两种金属光栅的透过率均增大, 而且随着周期的增大, 两种金属光栅的透过率均减小。这是由于对于 TM 波, 光栅周期越大, 发生异常透射的入射波长也就越大, 因此周期越大的亚波长金属光栅透过率越小。以波长为 0.8 μm 为例, 周期从 0.2 μm 增大到 0.5 μm 时, Al 光栅的透过率从 74% 降到

40%；Au 光栅的透过率从 82% 降到 34%，说明金属 Au 对周期的变化更敏感，若设计高透过式光栅可选择 Au 作为金属材料。

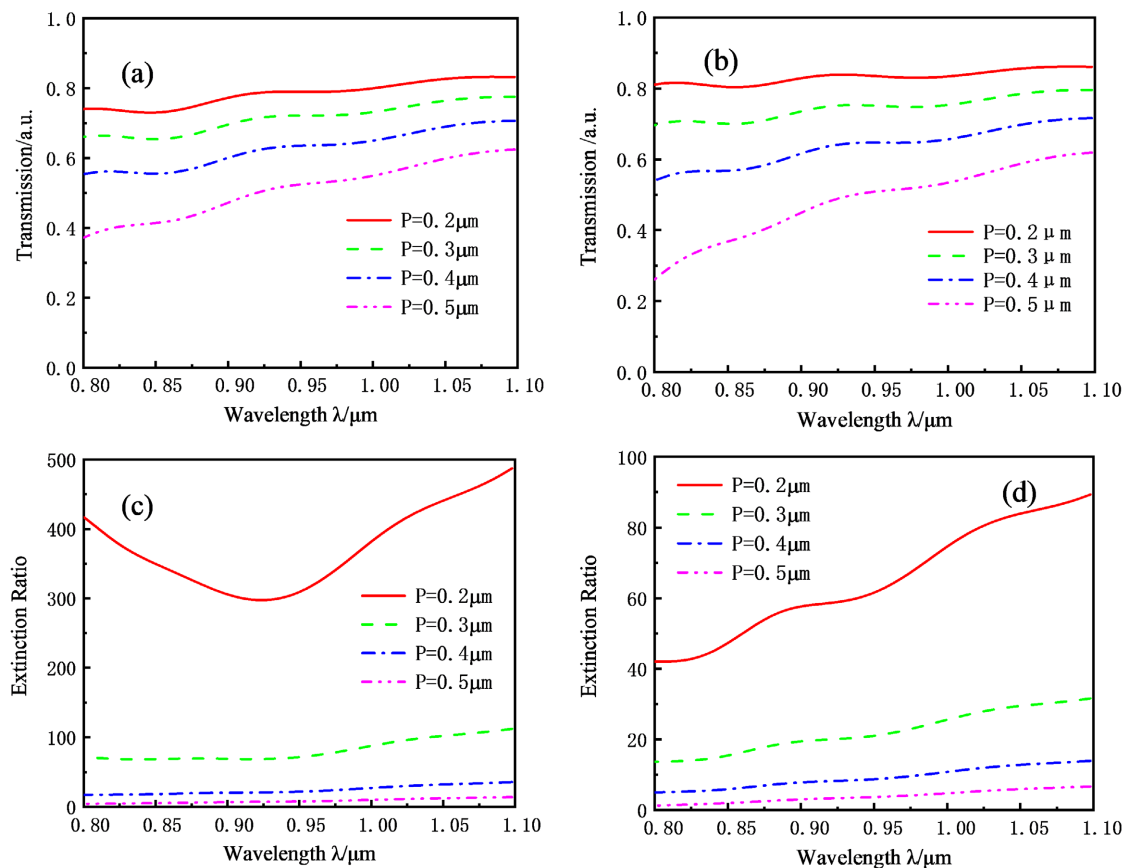


Figure 5. When the period is changed, the transmittance and extinction ratio of the two metal gratings change with the wavelength. (a) The transmittance of subwavelength metal Al grating varies with wavelength; (b) The transmittance of subwavelength metal Au grating varies with wavelength; (c) The extinction ratio of subwavelength metal Al grating varies with wavelength; (d) The extinction ratio of subwavelength metal Au grating varies with wavelength

图 5. 改变周期时，两种金属材料光栅透过率、消光比随波长变化。(a) 亚波长金属 Al 光栅透过率随波长变化；(b) 亚波长金属 Au 光栅透过率随波长变化；(c) 亚波长金属 Al 光栅消光比随波长变化；(d) 亚波长金属 Au 光栅消光比随波长变化

图 5(c)、图 5(d)分别是金属 Al、Au 作为光栅的材料时，改变光栅周期 P ，消光比随波长的变化。随着波长的增大，两种金属光栅的消光比均增大，以波长在 $1\mu\text{m}$ 为例，随着周期的增大，两种金属光栅的透过率均明显减小。原因是，当占空比一定时，光栅周期越大，对应栅条间隔也就越大，TE 透过率随之增大，所以在整个波长范围内，消光比随周期增大而减小。以周期在 $0.2\mu\text{m}$ ，波长在 $1.4\mu\text{m}$ 时为例，Al 光栅的消光比从 290:1 增大到 1000:1；Au 光栅的消光比从 43:1 增大到 250:1，可见 Al 光栅对消光比的影响作用更明显。

对于金属 Al 选取 $P = 0.3\mu\text{m}$ ，而金属 Au 选取周期 $P = 0.2\mu\text{m}$ 。

3.4. 光栅占空比对偏振性能的影响

不仅光栅的周期可以影响其偏振特性，而且光栅的占空比同样可以影响亚波长光栅的透过率和消光比。接下来，保持光栅的周期、厚度不变，改变光栅的占空比，观察 Al、Au 两种金属的透过率、消光

比随波长变化。光栅占空比的定义为光栅的线宽 w 与周期 P 的比值即 $F = \frac{w}{P}$ ，如图 6 所示：

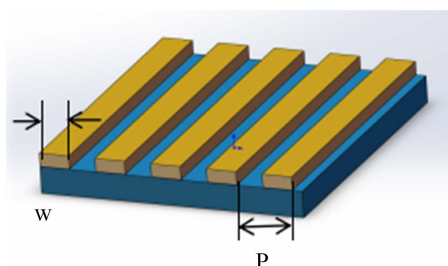


Figure 6. Schematic diagram of the duty cycle F of the subwavelength metal grating structure
图 6. 亚波长金属光栅结构占空比 F 示意图

当固定光栅周期和厚度、改变光栅占空比分别为 F 从 0.3 变化到 0.6 时，两种金属的透过率和消光比随波长的变化如图 7(a)~(d)。

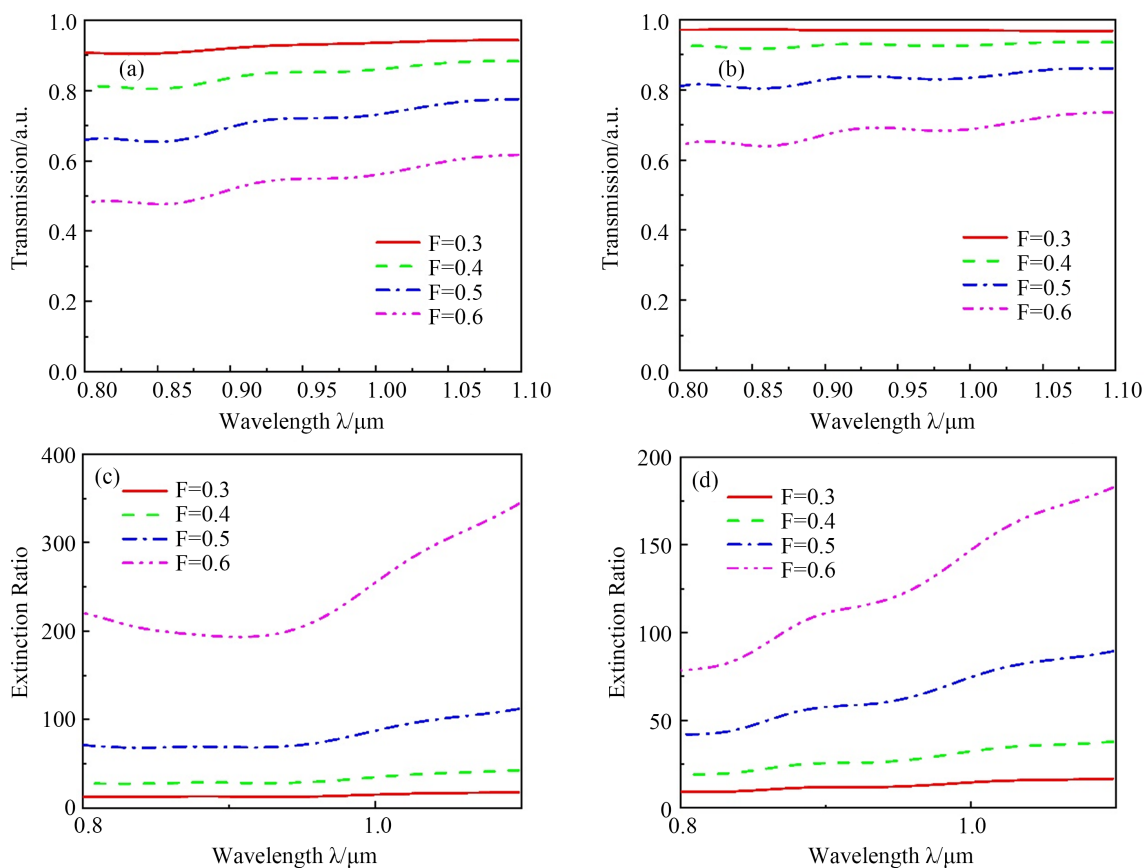


Figure 7. When the duty cycle is changed, the transmittance and extinction ratio of the two metal gratings vary with wavelength. (a) The transmittance of subwavelength metal Al grating varies with wavelength; (b) The transmittance of subwavelength metal Au grating varies with wavelength; (c) The extinction ratio of subwavelength metal Al grating varies with wavelength; (d) The extinction ratio of subwavelength metal Au grating varies with wavelength

图 7. 改变占空比时，两种金属材料光栅透过率、消光比随波长变化。(a) 亚波长金属 Al 光栅透过率随波长变化；(b) 亚波长金属 Au 光栅透过率随波长变化；(c) 亚波长金属 Al 光栅消光比随波长变化；(d) 亚波长金属 Au 光栅消光比随波长变化

图 7(a)、图 7(b)分别是金属 Al、Au 作为光栅的材料时, 改变占空比 F , 透过率随波长的变化。伴随波长的增大, 两种金属光栅的透过率均增大, 而且伴随占空比的增大, 两种金属光栅的透过率均减小。这是由于周期不变时, 占空比越小, 金属光栅层相当于一层介质膜, 大部分的光都可以从栅条间隙中透过, 从而透过率高; 相反, 占空比越大, 栅条间隙越小, 此时的光栅相当于一层金属膜, 透过光栅的光就越少, 从而透过率低。

图 7(c)、图 7(d)分别是金属 Al、Au 作为光栅的材料时, 改变占空比 F , 消光比随波长的变化。随着波长的增大, 两种金属光栅的消光比均增大, 两种金属光栅的消光比也与占空比成正比。由上文可知, 当光栅相当于介质膜时, 小部分 TE 波被反射, 所以消光比低; 当光栅相当于金属膜时, 大部分 TE 波被反射, 所以此时的消光比高。

对于金属 Al 和 Au, 透过率、消光比随波长变化的规律相同。占空比对两种金属光栅透过率影响基本相同, 而消光比的变化以 $F = 0.6$ 为例, 在波长在 $0.8 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 范围内 Al 光栅的消光比变化范围从 200:1 增长到 1000:1; Au 光栅从 95:1 增大到 500:1; Al 光栅的消光比增长范围为 Au 消光比增长范围的两倍。所以想要制作高消光比金属光栅时, 可以选择 Al 作为金属材料, 同时改变占空比。此时 Al 作为光栅的加工尺寸为 $P = 0.3 \mu\text{m}$, 占空比 $F = 0.5$; Al 作为光栅的加工尺寸为 $P = 0.2 \mu\text{m}$, 占空比 $F = 0.6$ 。

3.5. 光栅厚度对偏振性能的影响

图 8(a)~(d)分别是金属材料为 Al, $P = 0.3 \mu\text{m}$, $F = 0.6$ 时; 金属材料为 Au, $P = 0.2 \mu\text{m}$, $F = 0.5$ 时, 金属光栅透射效率以及消光比随着光栅厚度 h 的变化曲线。

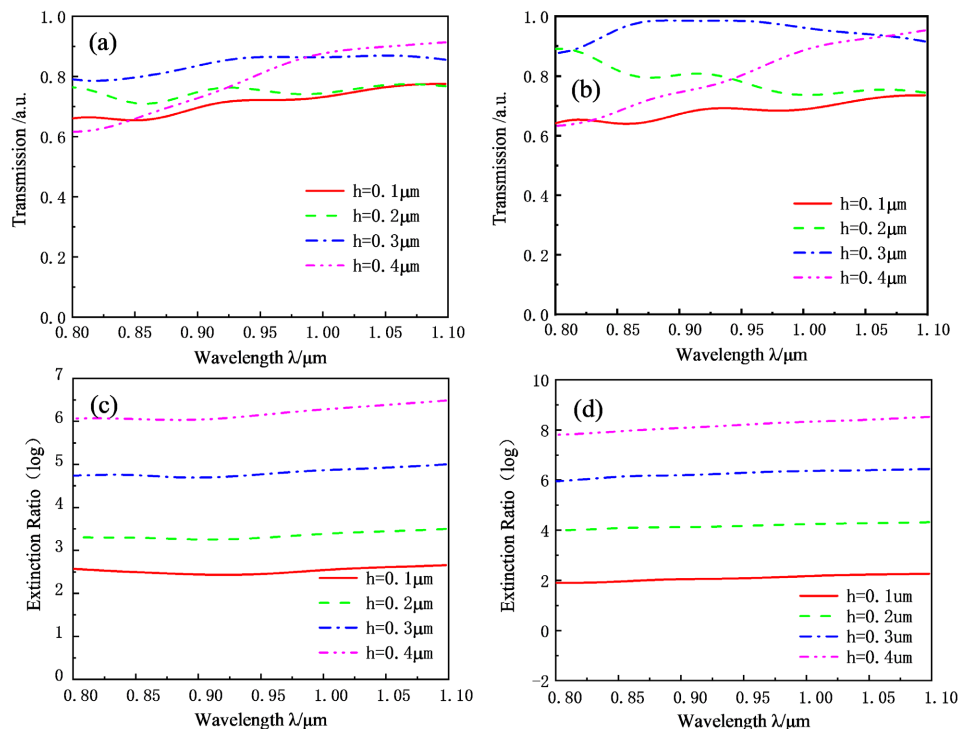


Figure 8. When the thickness is changed, the transmittance and extinction ratio of the two metal gratings change with the wavelength. (a) The transmittance of subwavelength metal Al grating varies with wavelength; (b) The transmittance of subwavelength metal Au grating varies with wavelength; (c) The extinction ratio of subwavelength metal Al grating varies with wavelength; (d) The extinction ratio of subwavelength metal Au grating varies with wavelength

图 8. 改变厚度时, 两种金属材料光栅透过率、消光比随波长变化。(a)亚波长金属 Al 光栅透过率随波长变化; (b)亚波长金属 Au 光栅透过率随波长变化; (c)亚波长金属 Al 光栅消光比随波长变化; (d)亚波长金属 Au 光栅消光比随波长变化

图 8(a)、图 8(b)分别是金属 Al、Au 作为光栅的材料时, 改变金属厚度, 透过率随波长的变化。图 8(c)、图 8(d)分别是金属 Al、Au 作为光栅的材料时, 改变金属厚度, 消光比随波长的变化。随着厚度的增加, TM 波透射峰右移, 且半峰宽度变大, 整体透过率变化不大, 但消光比增大趋势较为显著。

产生这种现象的原因是, 光线入射到金属表面时, 大部分光都反射, 只有极少部分能被透射, 并且透射光的能量和金属厚度有关, 金属的趋肤深度为:

$$d = \frac{\lambda}{4\pi k} \quad (14)$$

入射光波长表示为 λ , k 作为入射时金属材料的折射率虚部, 趋肤深度与虚部成反比。随着金属光栅层厚度的增大, TM 偏振光和 TE 偏振光的透射光都会随之减小。但是由等效介质理论, 对 TE 偏振光来说, 等效折射率的虚部比 TM 偏振光的大, 趋肤深度较小, 因此 TE 偏振光比 TM 偏振光的衰减程度更大, 消光比也会随着金属光栅厚度增大而逐渐增大。

增大厚度也是提高消光比的一种手段。但是过大的高宽比会提升制作难度。同样, 金属 Au 对于滤波调制优于金属 Al, 但是 Al 对消光比的影响胜于金属 Au, 所以最终 Al 厚度选取为 $h = 0.2 \mu\text{m}$, Au 的厚度定为 $h = 0.4 \mu\text{m}$ 。

在改变厚度这一变量时, 金属 Au 对 TM、TE 波的影响更大, 与 Al 相比, 相同条件下, Au 具有更高的透过率与消光比。如果选择金属 Au 作为亚波长金属光栅的材料时, 通过改变厚度来调节光栅的透过率与消光比, 将会具有比较明显的效果。

3.6. 结果分析

通过以上对不同材质、周期、占空比以及厚度的模拟, 优化结果后不同材质的光栅参数分别为对于 Al 光栅, 周期 $P = 0.3 \mu\text{m}$, 占空比 $F = 0.6$, 厚度 $h = 0.2 \mu\text{m}$; 为对于 Au 光栅, 周期 $P = 0.2 \mu\text{m}$, 占空比 $F = 0.5$, 厚度 $h = 0.4 \mu\text{m}$ 。确定参数后的金属 Al、Au 光栅结构以及确定参数后的透过率与消光比随波长变化分别如图 9、图 10:

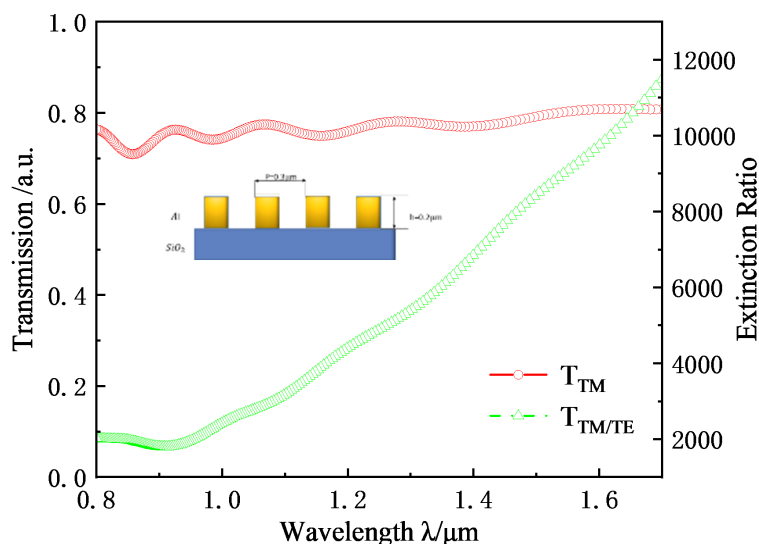


Figure 9. Schematic diagram of the cross-section of Al grating structure parameters and the corresponding transmittance and extinction ratio variation with wavelength

图 9. Al 光栅结构参数截面示意图及对应的透过率、消光比随波长变化图

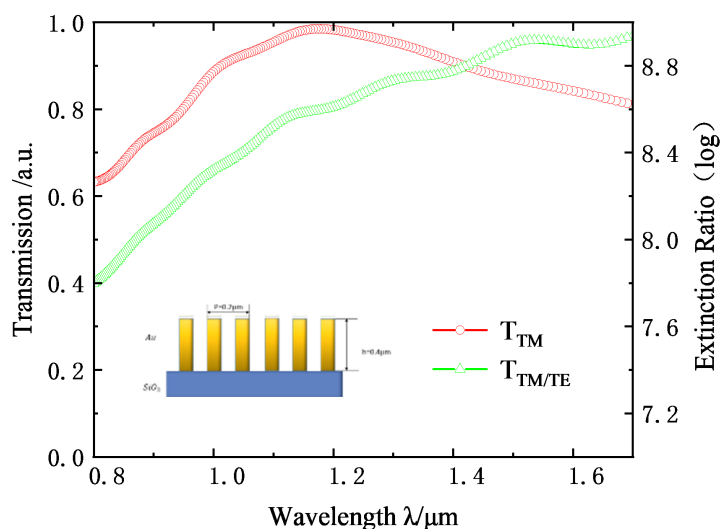


Figure 10. Schematic diagram of the cross-section of Au grating structure parameters and the corresponding transmittance and extinction ratio variation with wavelength

图 10. Au 光栅结构参数截面示意图及对应的透过率、消光比随波长变化图

对于金属 Al 和 Au 两种不同材质光栅的对比可知, Au 对 TM 的透过率影响略高于金属 Al, 而对比 Au, Al 对于消光比的影响较明显。说明金属 Au 更适合制作高透射率的亚波长偏振光栅; Al 更适合用做具有低损耗的亚波长偏振光栅。

4. 结论

通过利用 FDTD 软件对不同材料, 结构参数的亚波长金属光栅的设计, 在 0.8~1.7 μm 波段范围内的偏振特性研究。结果表明:

- 1) 周期是影响亚波长金属光栅的最重要参数之一, 在波长 0.8~1.7 μm 波段内, SiO_2 基底上的亚波长光栅, 产生异常透射的最大波长 $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$, 且周期越小, 透过率以及消光比的表现越好。
- 2) 在短波红外范围内, 针对高透过率的亚波长光栅可以选择将 Au 作为金属材料; 针对高消光比的亚波长光栅可以选择 Al 作为金属材料。

基于以上分析, 本文优化设计的近红外偏振滤光膜系具有良好的滤光、偏振功能, 与 CMOS/CCD 结合, 可用于偏振光谱成像芯片, 有效改善了传统偏振成像体积大、成本高的缺点, 为后续偏振成像分析提供了依据。

参考文献

- [1] Shaw, J.A. (2002) The Effect of Instrument Polarization Sensitivity on Sea Surface Remote Sensing with Infrared Spectroradiometers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **19**, 820-827. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019%3C0820:TEOIPS%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019%3C0820:TEOIPS%3E2.0.CO;2)
- [2] Zhang, J.H., Zhang, Y. and Shi, Z.G. (2018) Long-Wave Infrared Polarization Feature Extraction and Image Fusion Based on the Orthogonality Difference Method. *Journal of Electronic Imaging*, **27**, Article ID: 023021. <https://doi.org/10.1117/1.JEI.27.2.023021>
- [3] Sankaran, V., Walsh, J.T. and Maitland, D.J. (2002) Comparative Study of Polarized Light Propagation in Biologic Tissues. *Journal of Biomedical Optics*, **7**, 300-306. <https://doi.org/10.1117/1.1483318>
- [4] Kim, J.H., Kumar, S. and Lee, S.D. (1998) Alignment of Liquid Crystals on Polyimide Films Exposed to Ultraviolet

- Light. *Physical Review E*, **57**, 5644-5650.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.57.5644>
- [5] Matchko, R.M. and Gerhart, G.R. (2008) High-Speed Imaging Chopper Polarimetry. *Optical Engineering*, **47**, Article ID: 016001. <https://doi.org/10.1117/1.2829767>
- [6] Gendre, L., Foulonneau, A. and Bigue, L. (2011) Full Stokes Polarimetric Imaging Using a Single Ferroelectric Liquid Crystal Device. *Optical Engineering*, **50**, Article ID: 081209. <https://doi.org/10.1117/1.3570665>
- [7] El Ketara, M., Vedel, M. and Breugnot, S. (2016) Acquisition Method Improvement for Bossa Nova Technologies' Full Stokes, Passive Polarization Imaging Camera SALSA. Proceedings Volume 9853, Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing XII, 98530A. <https://doi.org/10.1117/12.2224357>
- [8] Tamada, H., Doumuki, T., Yamaguchi, T., *et al.* (1997) Al Wire-Grid Polarizer Using the *s*-Polarization Resonance Effect at the 0.8- μm -Wavelength Band. *Optics Letters*, **22**, 419-421. <https://doi.org/10.1364/OL.22.000419>
- [9] 本刊讯. Teledyne DALSA 新的区域相机采用 Sony IMX250-MZR 偏振图像传感器[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2018, 36(S1): 222.
- [10] Wang, Z., Yi, S., Chen, A., *et al.* (2019) Single-Shot On-Chip Spectral Sensors Based on Photonic Crystal Slabs. *Nature Communications*, **10**, Article No. 1020. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08994-5>
- [11] Yee, K. (1966) Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **14**, 302-307. <https://doi.org/10.1109/TAP.1966.1138693>
- [12] Ordal, M.A., Long, L.L., Bell, R.J., *et al.* (1983) Optical Properties of the Metals, Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti and W in the Infrared and Far Infrared. *Applied Optics*, **22**, 1099-1119. <https://doi.org/10.1364/AO.22.001099>
- [13] Hertz, H. (1888) *Electrical Waves*. Macmillan, New York.
- [14] Knop, K. (1978) Reflection Grating Polarizer for the Infrared. *Optics Communications*, **26**, 281-283. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(78\)90201-8](https://doi.org/10.1016/0030-4018(78)90201-8)
- [15] Zhou, L.B. and Liu, W. (2005) Broadband Polarizing Beam Splitter with an Embedded Metal-Wire Nanograting. *Optics Letters*, **30**, 1434-1436. <https://doi.org/10.1364/OL.30.001434>
- [16] 李云芳, 亚波长光学元件光学特性的研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2013.
- [17] 吴旌贺, 李永, 史小波, 等. 纳米铝表面超薄氧化层厚度的表征研究[J]. 河南教育学院学报(自然科学版), 2010, 19(4): 14-16.