

基于 Ag 纳米棒阵列的表面等离子激元微型偏振器

于 杰 张俊喜 张立德 费广涛

(中国科学院固体物理研究所材料物理重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要 采用静电近似理论计算了 Ag 纳米棒阵列在不同偏振光入射下的消光光谱。当入射光偏振方向平行于纳米棒长轴时会激发表面等离子激元纵向振动模式, 而当入射光偏振方向垂直于纳米棒长轴时会激发表面等离子激元横向振动模式。基于两种模式共振波长的不同, 采用 Ag 纳米棒阵列可以用来设计高性能的表面等离子激元微型偏振器。Ag 纳米棒阵列的偏振性能在纵向共振波长明显优于在横向共振波长, 通过调节纳米棒的纵横比可以对纵向模式的共振峰位进行大范围调控。结果表明这种微型偏振器所适用的波长能够通过纳米棒的纵横比在可见到近红外波段范围内调控, 而消光比和插入损耗能够通过纳米棒的直径和长度实现调控。

关键词 表面光学; 表面等离子激元; 微型偏振器; 纳米棒阵列; 纵向振动模式; 横向振动模式

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.0723001

Surface Plasmonic Micropolarizers Based on Ag Nanorod Arrays

Yu Jie Zhang Junxi Zhang Lide Fei Guangtao

(Key Laboratory of Materials Physics, Institute of Solid State Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract Extinction spectra of Ag nanorod arrays under incident light with different polarization directions are calculated by an electrostatics approximation theory. A longitudinal resonance mode of the localized surface plasmons (LSPs) can be excited when the polarization direction is parallel to the long axis of the nanorods, while a transversal resonance mode of the LSPs can be excited when the polarization direction is perpendicular to the long axis. In this case, high-performance plasmonic micropolarizers based on the different resonance wavelengths of the two modes can be designed by use of the Ag nanorod arrays. The polarization property of the Ag nanorod arrays at the longitudinal resonance wavelengths is prominently better than that at the transversal resonance wavelengths, and the resonance peak of the longitudinal mode can be tuned in a broad spectra region by adjusting the aspect ratio of the nanorods. The wavelength of the micropolarizers can be tuned from the visible to near-infrared spectra region by changing the aspect ratio of the nanorods. Moreover, the extinction ratio and insertion loss can also be adjusted by control of the diameter and length of the nanorods.

Key words optics at surfaces; surface plasmons; micropolarizer; nanorod array; longitudinal resonance mode; transversal resonance mode

OCIS codes 230.5440; 230.3990; 240.6680; 290.2200

1 引 言

光偏振在光开关、光调制和光隔离等光学元件中扮演重要角色。在许多光学元件中, 需要由偏振器来产生偏振光。随着光学技术的飞速发展, 偏振器的微型化和高性能将成为必然趋势, 而微型光偏

振元件便应运而生。它在光通讯、集成光学、光电探测中有重要的应用前景。

微型偏振器通常是采用金属线栅设计的, 设计的原理是依据金属线的各向异性。要设计适用于不同波段高性能的线栅微型偏振器, 线栅周期是一个

收稿日期: 2013-12-30; **收到修改稿日期:** 2014-02-11

基金项目: 国家自然科学基金(10804112)、国家 973 计划(2012CB932303)

作者简介: 于 杰(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事表面等离子激元共振方面的研究。E-mail: e153422388@163.com

导师简介: 张俊喜(1979—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事表面等离子激元方面的研究。E-mail: jxzhang@issp.ac.cn

(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

重要参数。随着金属线栅周期减小,线栅的偏振性能所适用的波长移向短波段。例如,具有微米尺度周期的金属线栅在太赫兹波段显示了很好的偏振性能^[1-4]。采用压印和蒸发技术设计周期为 500 nm 的 Al 线栅在 3.5~11 μm 中红外波段展示了明显的偏振现象^[5]。采用纳米压印和电子束蒸发相结合设计周期为 200 nm 的纳米线栅偏振器在 1.0~2.0 μm 近红外波段显示了很好的偏振性能^[6]。在氧化铝模板中组装金属纳米线所设计的线栅周期低于 100 nm,在近红外波段显示了很好的偏振性能,然而它们在可见波段的偏振性能显著下降(消光比低,插入损耗高)^[7-10]。以上线栅主要适用于红外波段的微型偏振器,而难以用于可见波段。

本文提出采用 Ag 纳米棒阵列设计在可见到近红外波段的新型微型偏振器。不同于常规的线栅偏振器,它是利用不同偏振方向的人射光激发不同表面等离子体共振模式,依据纵向和横向共振波长的不同而设计具有优异性能的微型偏振器,其偏振性能可以通过 Ag 纳米棒的尺度进行有效调控。

2 理论推导和讨论

2.1 理论推导

纳米棒阵列如图 1 所示,白色柱子是没有被纳米棒填充的模板的纳米通道(或纳米孔),而白色柱子底部的灰色区域是被纳米棒填充的部分,纳米棒位于纳米通道的底部。2a 和 2b 分别表示纳米棒的长度和直径,s 为纳米棒间距,h 和 d 分别是模板通道长度和阵列沿入射方向的厚度。当一束光沿着 z

方向垂直入射到 Ag 纳米棒阵列的截面时,Ag 纳米棒的消光截面 $C_{\text{ext},j}$ 可以表示为吸收截面 $C_{\text{abs},j}$ 和散射截面 $C_{\text{sca},j}$ 之和

$$C_{\text{ext},j} = C_{\text{abs},j} + C_{\text{sca},j}, \quad (1)$$

既然纳米棒的尺度远小于入射光波长,依据静电近似理论^[11-12],纳米棒的吸收截面和散射截面分别表示为

$$C_{\text{abs},j} = 4\pi k \text{Im}(\alpha_j), \quad (2)$$

$$C_{\text{sca},j} = \frac{8}{3}\pi k^4 |\alpha_j|^2, \quad (3)$$

式中 $k = 2\pi n_1/\lambda$ 为波数, n_1 为氧化铝折射率^[13]。 α_j 是电场平行($j = x$)和垂直($j = y$)于纳米棒长轴方向的极化率张量,纳米棒分散在真空介质中的极化率张量有如下形式^[12]

$$\alpha_j = \frac{V}{4\pi} \frac{n_2^2 - 1}{1 + L_j(n_2^2 - 1)}, \quad (4)$$

式中 V 为单根纳米棒的体积, $n_2 = n_s - ik_s$ 是 Ag 的复折射率(n_s 和 k_s 分别是复折射率的实部与虚部)^[14], L_j 是电场平行($j = x$)和垂直($j = y$)于纳米棒长轴方向的洛伦兹退极化因子。考虑到组装基质是氧化铝,只需用氧化铝的折射率代替真空介质的折射率,由此给出分散在氧化铝介质中的纳米棒的极化率张量

$$\alpha_j = \frac{V}{4\pi} \frac{n_2^2 - n_1^2}{n_1^2 + L_j(n_2^2 - n_1^2)}, \quad (5)$$

当入射光偏振方向沿 x 方向即平行于纳米棒长轴时,洛伦兹退极化因子可表示为

$$L_x = \frac{ab^2}{2} \int_0^\infty \frac{ds}{(s+a^2)^{3/2}(s+b^2)}, \quad (6)$$

对于纳米棒,沿 x 方向的洛伦兹退极化因子可简化如下:

$$L_x = \frac{1-e^2}{e^2} \left(\frac{1}{2e} \ln \frac{1+e}{1-e} - 1 \right), \quad e^2 = 1 - \frac{b^2}{a^2}, \quad (7)$$

当入射光偏振方向沿 y 方向即垂直于纳米棒长轴时,洛伦兹退极化因子可表示为

$$L_y = (1 - L_x)/2, \quad (8)$$

考虑到组装在氧化铝模板中的纳米棒是六角有序排列的,整个纳米棒阵列的消光系数 $\alpha_{\text{ext},j}$ 可表示为

$$\alpha_{\text{ext},j} = f C_{\text{ext},j} = 2C_{\text{ext},j}/(\sqrt{3}s^2h), \quad (9)$$

f 是单位体积纳米棒的数目,纳米棒阵列的消光 E_j 有如下形式

$$E_j = \log \frac{I_0}{I_{t,j}} = \log e \cdot (\alpha_{\text{ext},j} \cdot d), \quad (10)$$

式中 $I_0, I_{t,j}$ 分别为入射光强和透射光强, $e(2.71828$

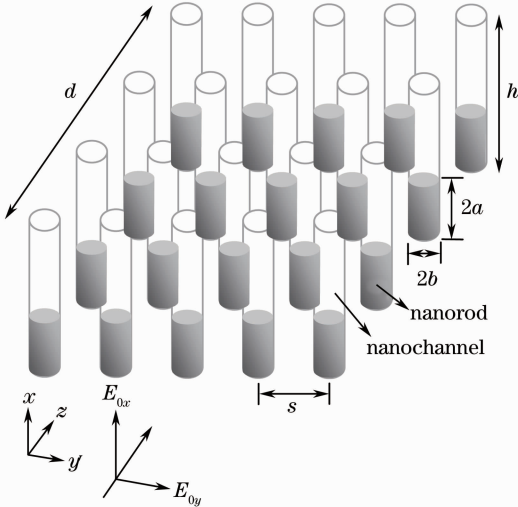


图 1 组装在氧化铝模板中的 Ag 纳米棒阵列示意图
Fig. 1 Schematic illustration of an Ag nanorod array embedded in anodic aluminum oxide

…)是自然对数的底数。由上述方程可计算 Ag 纳米棒阵列在不同偏振方向($j = x, y$)入射光照射下的消光光谱。

2.2 计算结果与讨论

2.2.1 采用 Ag 纳米棒阵列设计表面等离子激元微型偏振器的原理

依据(10)式对 Ag 纳米棒阵列的消光光谱进行模拟计算。这里以组装在硫酸模板中的 Ag 纳米棒阵列为例,纳米棒间距为 70 nm,模板通道长度和阵列厚度均为 10 μm 。对于直径 30 nm、长度 50 nm 的 Ag 纳米棒阵列来说,当入射光电矢量(偏振方向)平行于纳米棒长轴(沿 x 方向)时,在 563 nm 处出现一个强的消光峰(黑线 1)(图 2),它是源于激发表面等离子激元的纵向振动模式;当入射光电矢量(偏振方向)垂直于纳米棒长轴(沿 y 方向)时,在 426 nm 处出现一个较强的消光峰(红线 2),它是源于激发表面等离子激元的横向振动模式。可以看出纳米棒纵向共振波长大于横向共振波长,这是由于纳米棒的长度大于直径,在入射光激发下集体振荡的自由电子

在长轴方向受到的恢复力小于在短轴方向受到的恢复力,因而长轴方向的振动频率要慢于短轴(直径)方向的振动频率^[15]。注意到除了在纵向和横向共振波长出现强的消光以外,在偏离共振波长的位置消光接近零(即显示高的透光率),由此 Ag 纳米棒阵列能够作为一种表面等离子激元微型偏振器。譬如,在 563 nm 处,由于激发纵向振动模式,Ag 纳米棒阵列强烈地衰减电矢量平行于纳米棒长轴方向的光而它大幅度透过电矢量垂直于纳米棒长轴方向的光,消光比 $[10\log(I_0/I_{t,x})]$ 可达 139 dB,而插入损耗 $[10\log(I_0/I_{t,y})]$ 仅为 0.5 dB,显示了优异的偏振性能;另外,在 426 nm 处,由于激发横向振动模式,Ag 纳米棒阵列强烈地衰减电矢量垂直于纳米棒长轴方向的光而它大幅度透过电矢量平行于纳米棒长轴方向的光,消光比达 48 dB,而插入损耗为 2.1 dB,也展示了偏振现象。上述结果表明 Ag 纳米棒阵列的偏振性能在纵向共振波长明显优于在横向共振波长。

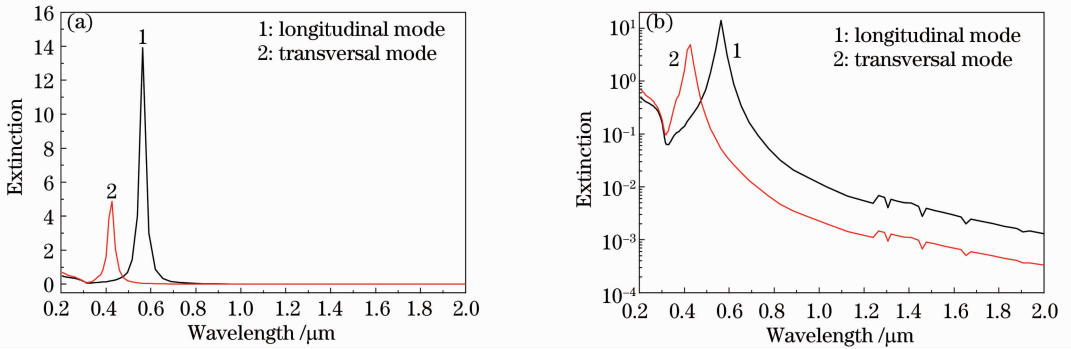


图 2 直径 30 nm、长度 50 nm Ag 纳米棒阵列的消光光谱。黑线和红线分别表示纵向和横向表面等离子激元振动模式。

(a)纵坐标为线性坐标; (b)纵坐标为对数坐标

Fig. 2 Extinction spectra of an array of Ag nanorods with diameter of 30 nm and length of 50 nm. The black and red curves denote the longitudinal and transversal resonance modes of localized surface plasmons, respectively.

(a) Extinction curves shown in a linear coordinate; (b) extinction curves shown in a logarithmic coordinate

2.2.2 表面等离子激元微型偏振器的性能调控

既然 Ag 纳米棒阵列作为表面等离子激元微型偏振器是基于表面等离子激元纵向和横向振动模式的不同,因此通过控制表面等离子激元共振可以对阵列的偏振性能进行调控。其中通过改变纳米棒的尺度调控其偏振性能是一种有效方式。当纳米棒直径不变时(如 30 nm),随着纳米棒长度从 40、80、120、200 nm 增加时,纵向共振峰发生显著的红移(515、728、886、1508 nm),而横向共振峰发生微小的蓝移(433、403、400、390 nm)(图 3)。注意到在消光光谱中位于 1240、1305、1459、1653 nm 处出现分立的

峰,这是由参考文献[14]所提供 Ag 的光学常数(复折射率)的数据误差引起的。另一方面,对于长度为 50 nm 的 Ag 纳米棒阵列,随直径从 15、20、30、40 nm 增加时,纵向共振峰发生明显的蓝移(826、689、563、496 nm),而横向共振峰发生轻微的红移(400、410、426、441 nm)(图 4)。

可以看到当固定纳米棒的一个尺度参数(如长度或直径)时,改变纳米棒的另一个尺度参数(如直径或长度)时,表面等离子激元共振峰均发生移动,由此说明共振峰不只是取决于纳米棒的长度或直径,事实上它是由纳米棒的纵横比(长度与直径的比值)

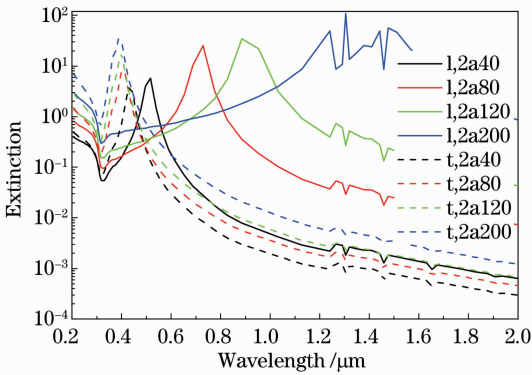


图 3 相同直径 (30 nm)、不同长度 (40、80、120、200 nm) Ag 纳米棒阵列的消光光谱,其中 l,2a40 指的是长度为 40 nm 的纳米棒的纵向模式,而 t,2a40 指的是长度为 40 nm 的纳米棒的横向模式

Fig. 3 Extinction spectra of the arrays of the Ag nanorods with a constant diameter of 30 nm and different lengths (40, 80, 120, 200 nm). Where l,2a40 means the longitudinal mode of the nanorods with a 40 nm length (solid curves), while t,2a40 corresponds the transversal mode (dash curves)

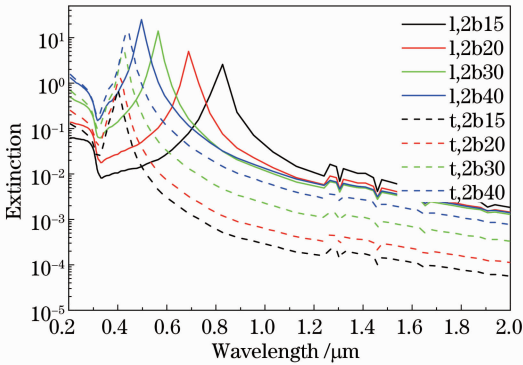


图 4 相同长度 (50 nm)、不同直径 (15、20、30、40 nm) 的 Ag 纳米棒阵列的消光光谱,其中 l,2b15 指 15 nm 直径纳米棒的纵向振动模式,而 t,2b15 指 15 nm 直径纳米棒的横向振动模式

Fig. 4 Extinction spectra of the arrays of the Ag nanorods with a constant length of 50 nm and different diameters (15, 20, 30, 40 nm). Where l,2b15 means the longitudinal mode of the nanorods with a 15 nm diameter (solid curves), while t,2b15 corresponds the transversal mode (dash curves)

决定的,特别是纵横比对纵向模式的共振峰的位置影响更大。具体地,当纳米棒直径一定时 (30 nm) 随长度从 40、80、120、200 nm 增加,相应纳米棒纵横比从 1.33、2.67、4.00 和 6.67 增加,纵向共振峰显示从 515 nm 到 1508 nm 红移(图 3);当纳米棒长度一定时 (50 nm),随直径从 15、20、30、40 nm 增

加,相应纳米棒纵横比从 3.33、2.50、1.67 到 1.25 减小,纵向共振峰显示从 826 nm 到 496 nm 蓝移(图 4);如果固定纳米棒的纵横比,发现纵向和横向共振峰都不发生任何移动(图 5),这进一步验证了共振峰的位置是由纳米棒的纵横比决定的。因此,通过调节纳米棒的纵横比,可以对纵向模式的共振峰位进行大范围调控,由此能够进一步调控表面等离子体微偏振器的应用波长(从可见到近红外波段)。

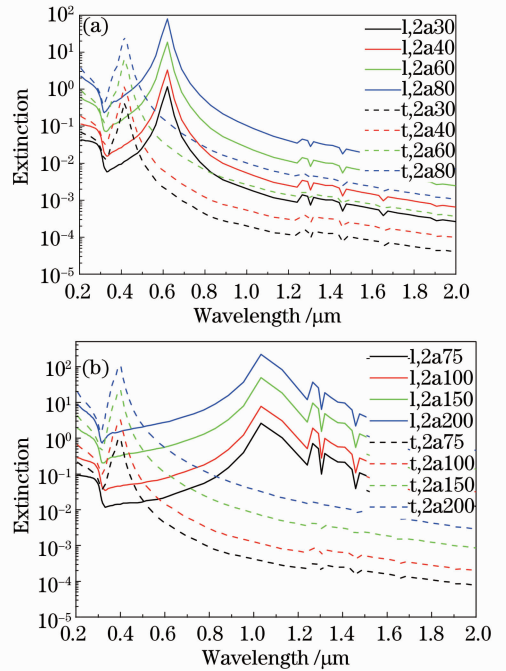


图 5 相同纵横比的 Ag 纳米棒阵列的消光光谱。(a) 纵横比为 2,直径分别为 15、20、30、40 nm,相应长度分别为 30、40、60、80 nm;(b) 纵横比为 5,直径分别为 15、20、30、40 nm,相应长度分别为 75、100、150、200 nm

Fig. 5 Extinction spectra of the arrays of the Ag nanorods with constant aspect ratios. (a) Constant aspect ratio is 2, the diameter is 15, 20, 30, 40 nm, respectively, the length corresponds to 30, 40, 60, 80 nm; (b) constant aspect ratio is 5, the diameter is 15, 20, 30, 40 nm, respectively, the length corresponds to 75, 100, 150, 200 nm

另一方面,表面等离子体微偏振器的消光比和插入损耗能够通过纳米棒的直径和长度进行调控。对于 30 nm 直径的 Ag 纳米棒,当纳米棒长度从 40、80、120、200 nm 增加,在 515、728、886、1508 nm 波长相应消光比从 56、248、339 dB 增加到 475 dB,相应的插入损耗从 1.3 dB、0.15 dB、0.1 dB 减小到 0.03 dB(图 3)。而对于 50 nm 长度的 Ag 纳米棒,随纳米棒

直径从 15、20、30、40 nm 增加时,在 826、689、563、496 nm 波长相应消光比从 26 dB、49 dB、139 dB 增加到 246 dB,相应的插入损耗从 0.005 dB、0.03 dB、0.5 dB 增加到 10 dB(图 4)。进一步从图 3 和图 4 不难看出,消光比受波长的影响小,它主要取决于纳米棒的长度和直径;而插入损耗虽然也受到纳米棒的长度和直径的影响,但它受波长的影响更大,这是因为插入损耗主要来源于纳米棒瑞利散射的贡献,随波长增加插入损耗显著降低。另外,在相同波长如 620 nm(纳米棒纵横比保持为 2),随纳米棒直径和长度增加,消光比从 11 dB、32 dB、182 dB 增加到 782 dB,而插入损耗从 0.02 dB、0.05 dB、0.3 dB 增加到 1.2 dB[图 5(a)];在相同波长如 1033 nm(纳米棒纵横比保持为 5),随纳米棒直径和长度增加消光比从 26 dB、76 dB、480 dB 增加到 2200 dB,而插入损耗从 0.004 dB、0.01 dB、0.07 dB 增加到 0.3 dB[图 5(b)]。因此,对于一个固定波长,通过调节纳米棒的直径和长度可以对阵列的消光比和插入损耗进行有效调控。

3 结 论

Ag 纳米棒阵列能够作为一种高性能的表面等离子激元微型偏振器,其原理是对于不同偏振方向的人射光可激发不同表面等离子激元振动模式(纵向模式和横向模式),在共振波长处纳米棒阵列具有强烈的消光行为,而偏离共振波长纳米棒阵列的消光接近于零即具有高的透光率。Ag 纳米棒阵列优异的偏振性能表现在:在纵向模式的共振波长处,Ag 纳米棒阵列强烈地衰减电矢量平行于纳米棒长轴方向的光,而它大幅度透过电矢量垂直于纳米棒长轴方向的光;而在横向模式的共振波长处,Ag 纳米棒阵列强烈地衰减电矢量垂直于纳米棒长轴方向的光,而它大幅度透过电矢量平行于纳米棒长轴方向的光。进一步表明 Ag 纳米棒阵列的偏振性能在纵向共振波长优于在横向共振波长。这种微型偏振器的波长可以通过改变纳米棒的纵横比实现在可见到近红外波段范围内调控,而消光比和插入损耗可以通过改变纳米棒的直径和长度实现调控。

参 考 文 献

- 1 I Yamada, K Takano, M Hangyo, *et al.*. Terahertz wire-grid polarizers with micrometer-pitch Al gratings [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(3): 274–276.
- 2 Wang Wentao, Liu Jianjun, Li Xiangjun, *et al.*. Direct fabrication of terahertz polarizer and filter by laser inducing and non-electrolytic plating with copper [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1231002.
王文涛, 刘建军, 李向军, 等. 激光诱导和化学镀铜制备太赫兹偏振器和滤波器[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1231002.
- 3 Liu Liming, Zhao Guozhong, Zhang Gaohui, *et al.*. Polarization characteristics of one-dimensional metallic wire-grating polarizer in terahertz frequency range [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(3): 0311001.
刘立明, 赵国忠, 张皋辉, 等. 太赫兹波段一维金属线栅的偏振特性研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0311001.
- 4 K Imakita, T Kamada, M Fujii, *et al.*. Terahertz wire grid polarizer fabricated by imprinting porous silicon [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(23): 5067–5070.
- 5 I Yamada, N Yamashita, K Tani, *et al.*. Fabrication of a mid-IR wire-grid polarizer by direct imprinting on chalcogenide glass [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(19): 3882–3884.
- 6 Wang Jianjim, Zhang Wei, Deng Xuegong, *et al.*. High-performance nanowire-grid polarizers [J]. *Opt Lett*, 2005, 30(2): 195–197.
- 7 M Saito, M Kirihara, T Taniguchi, *et al.*. Micropolarizer made of the anodized alumina film [J]. *Appl Phys Lett*, 1989, 55(7): 607–609.
- 8 Dong Yanfeng, Li Qingshan, Wu Fuquan, *et al.*. Polarization properties of anodic alumina film with implanted nanohole metallic arrays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(2): 247–250.
董艳锋, 李清山, 吴福全, 等. 含纳米金属阵列阳极氧化铝膜的偏振特性[J]. *光学学报*, 2004, 24(2): 247–250.
- 9 Zhang Junxi, Zhang Lide, Ye Changhui, *et al.*. Polarization properties of ordered copper nanowire microarrays embedded in anodic alumina membrane [J]. *Chem Phys Lett*, 2004, 400(1–3): 158–162.
- 10 Zhang Junxi, Yan Youguo, Cao Xueli, *et al.*. Microarrays of silver nanowires embedded in anodic alumina membrane templates: size dependence of polarization characteristics [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(2): 297–304.
- 11 C F Bohren, D R Huffman. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles* [M]. Weinheim: Wiley, 1998. 141–154.
- 12 van de Hulst H. C. *Light Scattering by Small Particles* [M]. New York: Wiley, 1957. 63–83.
- 13 F Gervais. *Insulators: Aluminum Oxide (Al₂O₃)*, In *Handbook of Optical Constants of Solids*, Palik E. D., ed. [M]. San Diego: Academic Press, 1985. 761–775.
- 14 D W Lynch, W R Hunter. *Metals: Comments on the Optical Constants of Metals and an Introduction to the Data for Several Metals*, In *Handbook of Optical Constants of Solids*, Palik E. D., ed. [M]. San Diego: Academic Press, 1985. 350–357.
- 15 Zhang Junxi, Zhang Lide. Nanostructures for surface plasmons [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2012, 4(2): 157–321.

栏目编辑: 韩峰