

# 银纳米线有序阵列的光偏振的理论研究\*

张俊喜<sup>†</sup> 张立德 常 明 燕友果 陆启飞

(中国科学院固体物理研究所, 合肥 230031)

(2004 年 6 月 8 日收稿; 2004 年 10 月 15 日收修改稿)

Zhang JX, Zhang LD, Chang M, *et al.* Optical polarization of ordered silver nanowire arrays: theoretical investigation. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2005, 22(4): 401 ~ 405

**摘 要** 报道了组装在氧化铝模板中的银纳米线有序阵列光偏振的数值计算结果. 进一步分析了阵列在可见—红外波段上显示光偏振的原因. 通过适当选择纳米线的直径与间距, 可以获得较大的消光比和较小的插入损耗, 从而为设计纳米线栅偏振器提供最佳工艺参数.

**关键词** 纳米线有序阵列, 光偏振, 理论研究

**中图分类号** TG149

## 1 引言

光偏振在光隔离、光调制、光开关等光学元件中扮演重要角色. 在许多光学元件和光电子元件中, 必不可少的是要由偏振器来产生或检验线偏振光. 偏振器的偏振性能如何, 将直接影响到这些元件的性能. 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. 它会在将来的光通讯、集成光学、光电探测中有重要的应用前景.

纳米线有序阵列由于在电子学<sup>[1~3]</sup>、光学<sup>[4~11]</sup>、磁学<sup>[12~15]</sup>、场发射<sup>[16,17]</sup>等方面表现出来的奇特性能及其在将来纳米器件中的潜在应用引起了人们的广泛关注和极大兴趣<sup>[18]</sup>. 其中金属纳米线有序阵列在可见—红外波段上显示了较好的偏振性能, 可被设计为这一波段上的微光学偏振元件.

目前开展纳米线有序阵列光偏振的研究还相当有限, 仅有单一直径、单一间距的金属纳米线有序阵列的初步实验结果<sup>[19,20]</sup>, 金属纳米线阵列产生光偏振的机理问题仍然没有得到解决, 线栅偏振器在纳米尺度上的新原理和新规律有待于进一步探索.

本文将介绍线间距相同、直径不同和线直径相同、间距不同的银纳米线有序阵列的光偏振的理论结果, 并简要分析金属线栅在纳米尺度上显示偏振特性的原由, 最终为设计纳米线栅偏振器提供最佳设计参数.

## 2 理论模型

图 1 为组装在氧化铝模板中的银纳米线有序阵列的结构示意图, 其中  $2a$  和  $b$  分别表示银纳米线的直径和间距. 入射光波的波长为  $\lambda$ , 氧化铝与银的折射率依次为  $n_a$  和  $n_s$ . 假设  $a \ll \lambda$ ,  $b \ll \lambda$ , 阵列的厚度  $d$  为  $10\mu\text{m}$ , 纳米线的长度  $l$  为  $60\mu\text{m}$ . 银纳米线有序阵列的光学损耗谱的理论计算是建立在纳米线之间

\* 国家重点基础研究项目(973)(19994506)资助

<sup>†</sup>E-mail: jxzhang@issp.ac.cn

的相互耦合作用基础之上的,其中这里介绍的一个模型是以一排纳米线为研究对象<sup>[21]</sup>,计算电矢量平行于纳米线轴向的偏振光垂直入射(H-polarization)和电矢量垂直于纳米线轴向的偏振光垂直入射(V-polarization)时的光学损耗,然后计算一定厚度(多排纳米线)的阵列在 H-polarization 和 V-polarization 两种情形下的光学损耗谱.

### 2.1 一排银纳米线的反射率与透射率

针对图 1 中的一排纳米线作为研究对象.当电矢量平行于纳米线轴向的线偏振光( $E_H$ )垂直入射到界面时,入射光的电场为  $E_\alpha$ ,纳米线左侧和右侧的电场分别为  $E_L$  和  $E_R$ ,而纳米线内部的电场用  $E_{2z}$  来表示.它们的具体表达式不难给出:

$$E_\alpha = E_0 \exp(-ik_1 z), \quad (1)$$

$$E_L = E_0 (\exp(-ik_1 z) + A \exp(ik_1 z)), \quad (2)$$

$$E_R = B E_0 \exp(-ik_1 z), \quad (3)$$

$$E_{2z} = E_0 \sum_{-\infty}^{\infty} C_m J_m(k_2 r) \exp(-im\theta). \quad (4)$$

其中,  $E_0$  为入射光波的振幅;  $k_1 = 2\pi n_a / \lambda$  和  $k_2 = 2\pi n_s / \lambda$  分别表示光波在氧化铝和银纳米线中传播的波数;  $A$  和  $B$  对应反射和透射系数;  $C_m$  为一待定系数;  $J_m$  为  $m$  阶的贝塞尔函数.在绝缘介质氧化铝和导电介质银纳米线的界面处利用电磁场边值关系可以进一步确定上述待定系数以及反射系数和透射系数.这里反射系数  $A$  和透射系数  $B$  的结果分别表示为

$$A = \left(1 - \frac{ib\eta_1}{\pi k_1 a^2}\right)^{-1} - \left(1 + \frac{ik_1 b(\eta_0 - \log 2)}{\pi}\right)^{-1}, \quad (5)$$

$$B = 1 - \left(1 - \frac{ib\eta_1}{\pi k_1 a^2}\right)^{-1} - \left(1 + \frac{ik_1 b(\eta_0 - \log 2)}{\pi}\right)^{-1}. \quad (6)$$

当电矢量平行于纳米线轴向的线偏振光垂直入射到一排纳米线和氧化铝界面上时,(5)式和(6)式中的  $\eta_0$  和  $\eta_1$  分别为

$$\eta_{0H} = \frac{J_0(k_2 a) - (k_2 a) J'_0(k_2 a) \log(\pi a/b)}{(k_1 a)^2 J_0(k_2 a)/2 + (k_2 a) J'_0(k_2 a)}, \quad (7)$$

$$\eta_{1H} = \frac{J_1(k_2 a) + (k_2 a) J'_1(k_2 a)}{J_1(k_2 a) - (k_2 a) J'_1(k_2 a)}. \quad (8)$$

而当电矢量垂直于纳米线轴向的线偏振光垂直入射到这一界面上时,(5)式和(6)式中的  $\eta_0$  和  $\eta_1$  分别为

$$\eta_{0V} = \frac{(k_2 a) J_0(k_2 a) / (k_1 a)^2 - J'_0(k_2 a) \log(\pi a/b)}{(k_2 a) J_0(k_2 a) / 2 + J'_0(k_2 a)}, \quad (9)$$

$$\eta_{1V} = \frac{(k_2 a) J_1(k_2 a) + (k_1 a)^2 J'_1(k_2 a)}{(k_2 a) J_1(k_2 a) - (k_1 a)^2 J'_1(k_2 a)}. \quad (10)$$

对于 H-polarization 和 V-polarization,一排纳米线的反射率与透射率可以从(5)式、(6)式中求出.其中  $R_H = |A_H|^2$ ,  $T_H = |B_H|^2$ ;  $R_V = |A_V|^2$ ,  $T_V = |B_V|^2$ .

### 2.2 多排银纳米线有序阵列的光学损耗

以计算一排纳米线反射率与透射率的模型为出发点,我们建立一种简化的、行之有效的计算多排纳米线有序阵列光学损耗谱的理论模型.这里选择多排纳米线的厚度  $d$  为  $10\mu\text{m}$ ,对应  $n$  排纳米线,如图 1

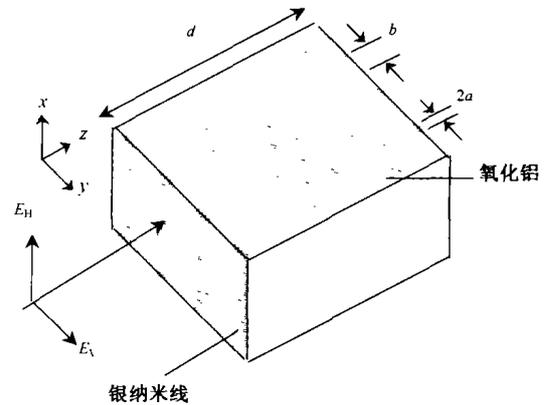


图 1 银纳米线有序阵列的结构示意图

所示.

设阵列的单位厚度( $\mu\text{m}$ )的光学损耗可以由(11)式求出:

$$\alpha = \frac{1}{(n-1)(\sqrt{3}/2)b} \log\left(\frac{1}{T^n}\right). \quad (11)$$

阵列的消光比为 $(\alpha_b - \alpha_v)d$ , 因为 $\alpha_b d \gg \alpha_v d$ , 所以阵列的消光比 $\alpha_b$  可以用 $\alpha_b d$  来代替, 而插入损耗 $\alpha_v$  为 $\alpha_v d$ , 经化简后有:

$$\alpha_b = \frac{-20}{\sqrt{3}b} \log T_H, \quad (12)$$

$$\alpha_v = \frac{-20}{\sqrt{3}b} \log T_V. \quad (13)$$

### 3 理论结果

依据(12)式和(13)式采用数值计算的方法可以模拟厚度为 $10\mu\text{m}$  间距相同、直径不同(表 1)以及直径相同、间距不同(表 2)的银纳米线有序阵列的光学损耗谱(包括消光比与插入损耗). 其中光学损耗谱所在的波段是在 $563.6 \sim 6199\text{nm}$  的范围内. 银和氧化铝在这一波段上的折射率是从文献[22]和文献[23]中获得的.

表 1 间距相同、直径不同的银纳米线尺度分布

$b/\text{nm}$	100		
$2a/\text{nm}$	40	60	80

表 2 直径相同、间距不同的银纳米线尺度分布

$2a/\text{nm}$	40		
$b/\text{nm}$	70	100	130

间距相同、直径不同的银纳米线有序阵列的光学损耗谱如图 2 所示, 其中 $\alpha_b$  和 $\alpha_v$  分别表示消光比与插入损耗. 从中看出对于单一直径的阵列在相应波长处的 $\alpha_b$  远大于 $\alpha_v$ , 且随波长增加 $\alpha_b$  增大而 $\alpha_v$  减小, 这与实验结果符合得较好<sup>[19]</sup>. 而当纳米线间距为 $100\text{nm}$  且直径从 $40\text{nm}$ 、 $60\text{nm}$  到 $80\text{nm}$  增加时, $\alpha_b$  与 $\alpha_v$  均增加, 但 $\alpha_v$  增加得更快.

对上面的变化规律进行初步的理论分析, 认为电矢量平行于纳米线轴向的线偏振光(H-polarization)垂直入射时, 银中的自由电子在电场的作用下沿纳米线的轴向运动并与晶格碰撞, 而以吸收的方式损失能量, 同时部分入射光波在金属线界面上发生强烈反射. 因而对 H-polarization 来讲, 金属的吸收和反射导致很大的光学损耗(对应消光比 $\alpha_b$ ), 从而出现“消光状态”. 而当电矢量垂直于纳米线轴向的线偏振光(V-polarization)垂直入射时, 相应的电场几乎不能驱动银中的自由电子沿垂直于纳米线的轴向运动, 只有在这一尺度上银纳米线对光波产生瑞利散射, 这种散射的强度与 H-polarization 的情况下那种强烈的反射和吸收相比很弱. 所以对 V-polarization 来讲, 瑞利散射将导致很小的插入损耗 $\alpha_v$ . 我们不难发现下面的一个事实: 即对于金属薄膜, 在可见

一红外波段上随波长的增加它的反射率与吸收率都增加, 且增加的趋势与图 2 中单一直径的纳米线阵列相一致. 而且瑞利散射与波长的 4 次方成反比, 这同样与图 2 单一直径的纳米线阵列相一致.

纳米线直径的增加意味着复合薄膜中金属银含量增加, 对于 H-polarization 有更多的银参与吸收和反射, 因而随直径的增加, 消光比增大; 而对 V-polarization 有更多的银参与瑞利散射.

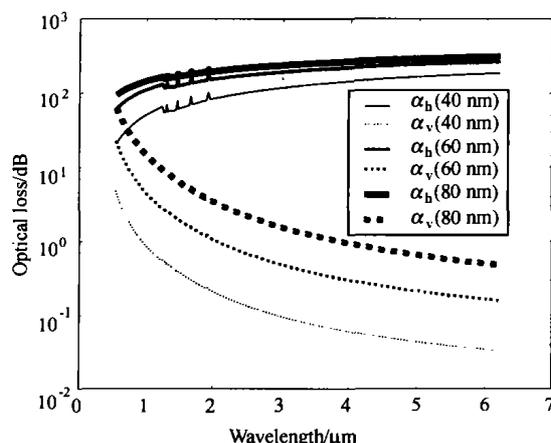


图 2 间距相同( $100\text{nm}$ )、直径不同的银纳米线有序阵列的光学损耗谱

图 3 给出的是直径相同、间距不同的银纳米线有序阵列的光学损耗谱. 我们从中发现当纳米线直径为 40nm, 而间距从 130nm、100nm 到 70nm 减小时,  $\alpha_h$  与  $\alpha_v$  均增加.

在纳米线直径一定时随间距的减小, 银纳米线数目增加, 对 H-polarization 而言有更多的银参与吸收和反射, 致使消光比增加; 而对 V-polarization 来讲更多的银参与瑞利散射, 导致插入损耗随间距的减小而增加.

## 4 结论

银纳米线有序阵列在可见—红外波段上显示了较好的偏振性能. 消光比来自于银纳米线的吸收和反射, 而插入损耗来自于银纳米线的瑞利散射. 通过适当调节组装在氧化铝模板中的银纳米线的直径与间距, 可以实现较高的消光比和较低的插入损耗, 从而为设计具有高性能的微光学偏振元件提供工艺参数.

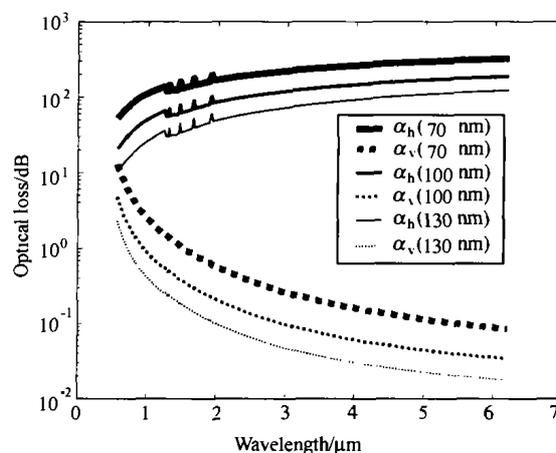


图 3 直径相同(40nm)、间距不同的银纳米线有序阵列的光学损耗谱

## References

- [ 1 ] Elhoussine F, Mátéfi-Tempfli S, Encinas A, *et al.* Conductance quantization in magnetic nanowires electrodeposited in nanopores. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 81(9):1681 ~ 1683
- [ 2 ] Mbindyo JKN, Mallouk TE, Mattzela JB, *et al.* Template synthesis of metal nanowires containing monolayer molecular junctions. *J. Am. Chem. Soc.*, 2002, 124(15):4020 ~ 4026
- [ 3 ] Huang Y, Duan X, Lieber C, *et al.* Directed Assembly of One-Dimensional Nanostructures into Functional Networks. *Science*, 2001, 291(5504): 630 ~ 633
- [ 4 ] Huang MH, Mao S, Yang P, *et al.* Room-temperature ultraviolet nanowire nanolasers. *Science*, 2001, 292(5523):1897 ~ 1899
- [ 5 ] Li Y, Meng GW, Zhang LD, *et al.* Ordered semiconductor ZnO nanowire arrays and their photoluminescence properties. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, 76(15):2011 ~ 2013
- [ 6 ] Zheng MJ, Zhang LD, Li GH, *et al.* Ordered indium-oxide nanowire arrays and their photoluminescence properties. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, 79(6):839 ~ 841
- [ 7 ] Lei Y, Zhang LD, Meng GW, *et al.* Preparation and photoluminescence of highly ordered TiO<sub>2</sub> nanowire arrays. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, 78(8): 1125 ~ 1127
- [ 8 ] Liu C, Zapfen JA, Lee ST, *et al.* High-density, ordered ultraviolet light-emitting ZnO nanowire arrays. *Adv. Mater.*, 2003, 15(10):838 ~ 841
- [ 9 ] Zheng M, Zhang L, Zhang X, *et al.* Fabrication and optical absorption of ordered indium oxide nanowire arrays embedded in anodic alumina membranes. *Chem. Phys. Lett.*, 2001, 334(4-6):298 ~ 302
- [ 10 ] Lin Y, Xie T, Zhang LD, *et al.* Ordered nickel oxide nanowire arrays and their optical absorption properties. *Chem. Phys. Lett.*, 2003, 380(5-6): 521 ~ 525
- [ 11 ] Lin Y, Wu GS, Zhang LD, *et al.* Fabrication and optical properties of TiO<sub>2</sub> nanowire arrays made by sol-gel electrophoresis deposition into anodic alumina membranes. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2003, 15(17):2917 ~ 2922
- [ 12 ] Zeng H, Skomski R, Menon L, *et al.* Structure and magnetic properties of ferromagnetic nanowires in self-assembled arrays. *Phys. Rev. B*, 2002, 65(13):134426/1 ~ 134426/6
- [ 13 ] Paulus PM, Luis F, Kröll M, *et al.* Low-temperature study of the magnetization reversal and magnetic anisotropy of Fe, Ni, and Co nanowires. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2001, 224(2):180 ~ 196
- [ 14 ] Wang YW, Zhang LD, Meng GW, *et al.* Fabrication of ordered ferromagnetic-nonmagnetic alloy nanowire arrays and their magnetic property dependence on annealing temperature. *J. Phys. Chem. B*, 2002, 106(10):2502 ~ 2507
- [ 15 ] Guo Y, Wan L, Bai C, *et al.* Ordered Ni-Cu nanowire array with enhanced coercivity. *Chem. Mater.*, 2003, 15(3):664 ~ 667
- [ 16 ] Vila L, Vincent P, Piroux L, *et al.* Growth and field-emission properties of vertically aligned cobalt nanowire arrays. *Nano Lett.*, 2004, 4(3):521 ~ 524

- [17] Chen J, Deng SZ, Xu NS, *et al.* Field emission from crystalline copper sulphide nanowire arrays. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 80(19):3620 ~ 3622
- [18] Zhang LD, Mou JM. *Nanomaterials and Nanostructures*. Beijing: Science Press, 2001 (in Chinese)
- [19] Pang YT, Meng GW, Zhang LD, *et al.* Silver nanowire array infrared polarizers. *Nanotechnology*, 2003, 14(1):20 ~ 24
- [20] Pang YT, Meng GW, Zhang LD, *et al.* Arrays of ordered Pb nanowires and their optical properties for laminated polarizers. *Adv. Funct. Mater.*, 2002, 12(10):719 ~ 722
- [21] Saito M, Miyagi M. Anisotropic optical loss and birefringence of anodized alumina film. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1989, 6(12):1895 ~ 1900
- [22] Palik ED, *Handbook of Optical Constants of Solids*. New York: Academic Press, 1985. 356 ~ 357
- [23] Lang ML, Wolfe WL. Optical constants of fused silica and sapphire from 0.3 to 25  $\mu\text{m}$ . *Appl. Opt.*, 1983, 22(9):1267 ~ 1268

#### 附中文参考文献

- [18] 张立德,牟季美. *纳米材料和纳米结构*. 北京:科学出版社, 2001

## Optical Polarization of Ordered Silver Nanowire Arrays: Theoretical Investigation

ZHANG Jun-Xi ZHANG Li-De CHANG Ming YAN You-Guo LU Qi-Fei

(*Institute of Solid State Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

**Abstract** We report the numerical calculation results of ordered silver nanowire arrays embedded in anodic alumina membrane (AAM). Furthermore, the reason of optical polarization of the arrays in the visible and infrared wavelength regions is analyzed. To provide the optimal parameters for the design of nanowire grid polarizers at the wavelengths, we can obtain larger extinction ratios and smaller insertion losses by properly selecting the nanowire diameter and spacing.

**Key words** ordered nanowire arrays, optical polarization, theoretical investigation