

文章编号: 0253-2239(2010)04-1158-04

带有高折射率介质层的金属光栅偏振器特性的研究

周云申 溯叶燕 浦东林 陈林森

(苏州大学信息光学工程研究所, 江苏 苏州 215006)

摘要 研究了一种亚波长金属光栅偏振器在可见光波段的透射与消光特性。与传统亚波长光栅偏振器不同的是, 通过在基底和光栅之间增加一层高折射率介质薄膜, 提高了 TM 偏振光透射率和消光比。利用严格耦合波分析法(RCWA), 模拟了高折射率介质层厚度、光栅占宽比对透射率和消光比的影响。计算结果表明, 在整个可见光波段, 合适的介质层厚度可使透射更加均匀并且当入射角在 $0\sim 60^\circ$ 变化时, TM 偏振光的透射率和消光比仍可分别达到 79% 和 50 dB。这种带有高折射率介质层的亚波长金属光栅偏振器结构紧凑, 性能优良, 特别适合作为液晶平板显示中的偏振分光器件。

关键词 偏振器; 严格耦合波分析法; 金属光栅

中图分类号 O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS20103004.1158

Research on the Characteristics of Subwavelength Metal Grating Polarizers with a High Refractive-Index Dielectric Layer

Zhou Yun Shen Su Ye Yan Pu Donglin Chen Linsen

(Institute of Information Optical Engineering, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

Abstract Transmission and extinction characteristics of a novel double-layer sub wavelength metal grating polarizer at visible region are investigated theoretically. The difference between the polarizer proposed and conventional lies in that the high refractive index dielectric layer is inserted between the substrate and grating, which increase the transmissivity and extinction ratios. By using rigorous couple-wave analysis (RCWA), the transmissivity and extinction ratios of transverse-magnetic wave (TM) polarization are analyzed as a function of the thickness of the high refractive index dielectric layer and the duty cycle. Simulation results show that the transmissivity is more uniform compared with that of the conventional type in visible region. When the incident angle range is $0\sim 60^\circ$, the TM transmissivity is still about 79% and the extinction ratios is higher than 50 dB. The polarizers is very compact and suitable for backlight unit used in liquid crystal devices.

Key words polarizer; rigorous coupled-wave analysis; metal grating

1 引言

液晶器件具有独特的电光调制特性, 因而被广泛应用于显示、通讯和传感系统中。偏振片是液晶光电器件中必不可少的组成元件。在传统的液晶平板显示器中, 液晶盒夹在两片正交的偏振片之间, 实

现了高对比度(大于 2000:1)显示。这类偏振片通常由拉伸后的聚乙烯醇薄膜制备而成, 这是因为拉伸后的聚乙烯醇薄膜具有偏振吸收特性, 即对沿拉伸方向偏振的光具有强烈的吸收作用, 而对垂直于拉伸垂直偏振的光吸收率则较小。聚乙烯醇薄膜偏

收稿日期: 2009-03-09; 收到修改稿日期: 2009-05-27

基金项目: 国家自然科学基金(60777039)、国家 863 计划(2006AA04Z318)和高校省级重点实验室开放(KJS0805)资助课题。

作者简介: 周云(1980—), 女, 博士研究生, 主要从事高功率激光微纳米结构刻蚀、亚波长光学器件相关的理论和工艺等方面的研究。E-mail: zyun@suda.edu.cn

导师简介: 陈林森(1961—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光全息技术、信息光学、微纳光学关键技术、材料与系统等方面的研究。E-mail: lschen@suda.edu.cn

振片的厚度约为 $200\ \mu\text{m}$ ，透射率仅 40% ，是造成目前液晶平板显示中光能利用低(约 5%)的主要原因。设计基于新原理的偏振片，在可见光波段上实现对某一偏振方向入射光的高透射率和高消光比，同时反射正交偏振方向的入射光，使这部分光返回背光模组中重新利用，成为背光显示、无源微纳光器件领域的热点研究内容。

研究发现，亚波长金属光栅的透反射特性与偏振态相关^[1~14]。亚波长金属光栅的周期比入射波长小得多，偏振方向与光栅栅线平行的入射光入射(TE 偏振)将被反射，而偏振方向与光栅栅线垂直的光(TM 偏振)将会透射。亚波长金属光栅具有上述独特的偏振特性的物理机制在于，TE 偏振光能激发纳米金属线的电子而产生电流，使得沿该方向偏振的光发生反射；而对 TM 偏振光，由于纳米金属线之间的空气间隙不能激发电流，从而发生透射^[15]。

张娜等^[1]，孟凡涛等^[2]和刘颖等^[16]研究发现，在基底和单层亚波长金属光栅结构之间增加一层波长量级厚度相当的氟化镁介质，可以有效地提高 TM 偏振光的透射率及消光比。随着微纳加工技术的进步，亚波长金属光栅偏振器从单层结构发展到双层结构。相比单层结构，双层亚波长金属光栅不仅具有更加优越的偏振性能，而且降低了工艺容差的要求，因而引起了越来越多研究者的兴趣。在 2000 年 S. Chou 设计了一种双层结构亚波长金属光栅偏振器^[6,7]，在 $500\sim 700\ \text{nm}$ 波长范围内 TM 偏振光的透射率大于 70% ，但对波长小于 $400\ \text{nm}$ 的蓝紫光，透射率仅为 63% ，导致在可见光范围内透射光强不均匀。

本文提出了一种新的纳米金属光栅偏振器结构。利用严格耦合波分析法(RCWA)计算的结果表明，通过在基底和介质-金属光栅之间增加了一层高折射率介质层，可在整个可见光波段改善 TM 偏振光的透射特性，提高透射率和消光比的同时，还具有更加均匀的透射光谱强度。

2 带有高折射率介质层的亚波长金属光栅偏振器结构

设计的双层金属亚波长光栅偏振器的结构如图 1 所示。在透明衬底(n_s)上沉积一层高折射率介质层 n_H ，介质层厚度 h_1 。亚波长金属光栅周期为 p ，高度为 h_3 。第二层金属光栅沉积在介质光栅上，与介质光栅具有相同的宽度 w 。这里定义占空比： $F=w/p$ 。介质光栅高度为 h_2 。入射光从光栅一侧以 θ 角入射。在后面的数值模拟中，透明基底和介质光栅材料为聚

甲基丙烯酸甲酯(PMMA)，折射率与基底相同，即 $n_S=n_G=1.48$ ，光栅周期 $p=0.1\ \mu\text{m}$ ，金属铝(Al)在可见光波段具有较好的光学特性，选作金属光栅材料，色散曲线依照 Drude 模型。

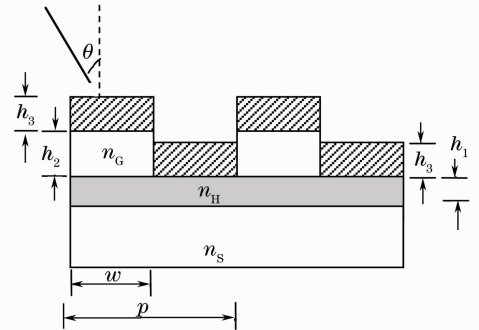


图 1 亚波长双层金属光栅偏振器的结构图
Fig. 1 Schematic of the subwavelength double-layer metal grating polarizer with a high RI layer

3 数值模拟和分析

采用严格耦合波分析法(RCWA)模拟提出的亚波长金属光栅偏振器的透反射特性。RCWA 基于 Maxwell 方程，是一种严格矢量波分析方法，在计算色散的金属材料时也具有较好的收敛性^[17,18]。下面就高折射率介质层厚度、光栅占空比和入射角等对偏振性能的影响进行分析。

3.1 高折射率介质层的厚度对性能的影响

为了讨论高折射率介质层厚度对于亚波长双层金属光栅的光学性能的影响，取入射波长 $\lambda=400\ \text{nm}$ ，垂直入射($\theta=0$)， $F=0.5$ ， $n_H=1.8$ ， $h_2=0.1\ \mu\text{m}$ ， $h_3=0.08\ \mu\text{m}$ 。计算得到的高折射率介质层厚度对 TM 偏振(实线)和 TE 偏振(虚线)透射率的关系，如图 2 所示。

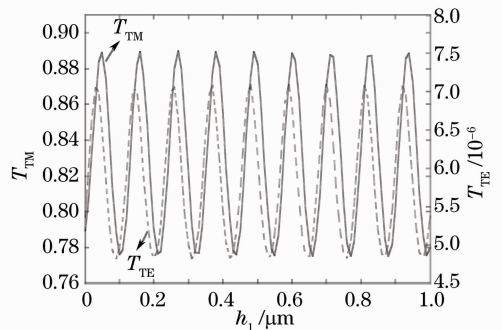


图 2 TM 光, TE 光的透射率与高折射率介质层的厚度的关系

Fig. 2 Transmissivity η of TM component and TE component as a function of the thickness of the high refractive index dielectric layer

增加的高折射率介质层调制了 TM 和 TE 偏振的透射率。随着介质层厚度 h_1 的增加, TM 偏振的透射率在 78%~89% 之间呈周期性变化, TE 偏振透射率在 $4.8 \times 10^{-6} \sim 7.0 \times 10^{-6}$ 之间呈周期性变化, 两个偏振的透射率变化周期不同。这是因为 TM 偏振光和 TE 偏振光的等效折射率不同造成的^[13]。当 $h_1 = 0.05 \mu\text{m}$ 时, TM 偏振透射率为 89%, 与未增加高折射率介质层相比, 透射率提高了 14.1%。由此可见, 增加合适厚度的高折射率介质层, 可以大幅度提高 TM 偏振的透射率。

考察加入高折射率介质层后, 器件在可见光波段的透射特性将会被改善。TM 偏振的透射率和消光比随波长的变化, 如图 3 和图 4 所示, 其中高折射率介质层厚度 h_1 取为 $0.05 \mu\text{m}$ 。在整个可见光波段, TM 偏振的透射率大于 84%, 而没有高折射率介质层时 ($h_1 = 0$), TM 偏振最小透射率只有 76%, 且前者具有更均匀的透射性能。与此同时, TE 的反射率为 98.5%。从图 4 可以看出, 增加高折射率介质层后, 透射消光比降低幅度很小, 仍然大于 50 dB 对偏振器性能影响不明显。因此, 增加合适高

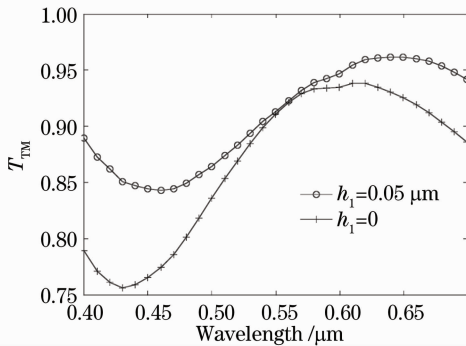


图 3 TM 光的透射率随波长的变化

Fig. 3 Transmissivity η of TM component as a function of wavelength

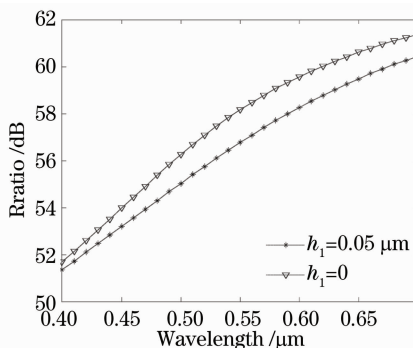


图 4 TM 光的消光比随波长的变化

Fig. 4 Extinction ratios of TM component as a function of wavelength

度的高折射率介质层, 可以使得双层金属光栅偏振器在整个可见光波段, 具有更均衡的透射性能。

3.2 占宽比对性能的影响

在亚波长光栅中, 占宽比会对透射率产生影响。这里占宽比 F 选取范围在 0.3~0.7 之间。入射光垂直入射, 其它模拟参数与前同。TM 偏振的透射率和消光比随入射波长的变化, 分别如图 5 和图 6 所示。当 $F=0.5$ 时具有最佳效果, 在整个可见光波段, TM 光的透射率大于 84%, 消光比大于 51.4 dB。

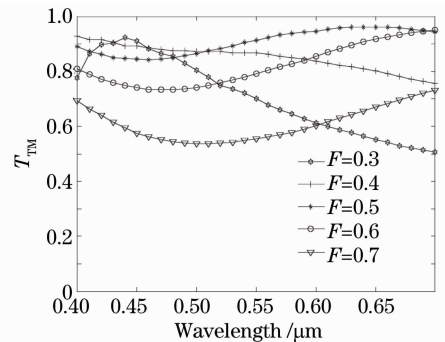


图 5 占宽比对 TM 光的透射率的影响

Fig. 5 Relationship between the duty cycle (F) and the transmissivity for TM component (T_{TM})

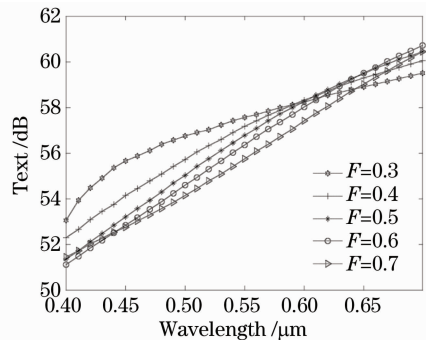


图 6 占宽比对 TM 光的消光比的影响

Fig. 6 Calculated relationship between the duty cycle (F) and the extinction ratios for TM component

3.3 入射角对性能的影响

透射率和消光比随入射角的变化, 分别如图 7 和图 8 所示。介质层厚度 h_1 取为 $0.05 \mu\text{m}$, 其它参数与图 2 相同。可以看到, 在整个可见光波段范围内, 入射角 θ 在 $0 \sim 60^\circ$ 变化时, TM 偏振的透射率大于 79%, 消光比大于 50 dB。当入射角大于 60° 时, 偏振器的透射性能会大幅度下降。透射率和消光比对入射角度的不敏感, 使得所述偏振器满足 LCD 显示的要求。

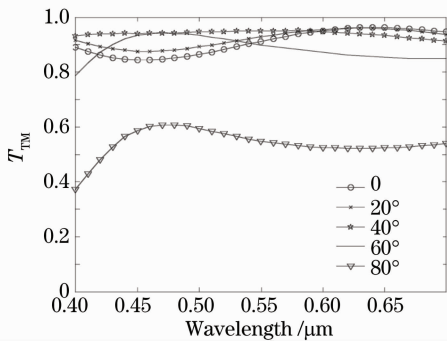


图7 TM光的透射率随入射角的变化

Fig. 7 Transmissivity as a function of the incident angle for TM component

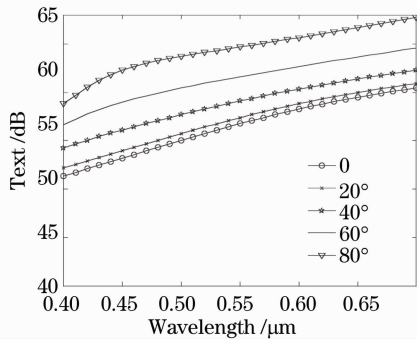


图8 TM光的消光比随入射角的变化

Fig. 8 Extinction ratios as a function of the incident angle for TM component

4 结 论

针对液晶平板显示器件中所应用的偏振器件, 研究了一种带有高折射率介质层的亚波长金属光栅偏振器在可见光波段的透射与消光特性。利用严格耦合波分析法(RCWA)的模拟结果表明, 高折射率介质层的加入改善了传统偏振片的性能, 当入射角在 $0\sim 60^\circ$ 变化时, TM偏振光具有高的透射率(大于79%)和消光比(高于50dB), TE偏振光反射率大于98%。在实际制作过程中, 金属光栅层不可能是矩形, 而是光滑曲面, 它的光学特性会有一定程度的下降, 但仍然大于40 dB。这种偏振器特别适合作为液晶平板显示中的下偏振片, 能够大幅度提高其光能利用率, 具有很高的应用价值。

参 考 文 献

1 Zhang Na, Chu Jinkui, Zhao Kaichun *et al.*. The design of the subwavelength wire-grid polarizers based on rigorous couple-wave theory[J]. *Chinese J. Sensors and Actuators*, 2006, **19**(5): 1739~1743
张娜, 褚金奎, 赵开春等. 基于严格耦合波理论的亚波长金属光栅偏振器设计[J]. *传感技术学报*, 2006, **19**(5): 1739~1743

2 Meng Fantao, Chu Jinkui, Han Zhitao *et al.*. Design of the sub-wavelength wire-grid polarizers [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2007, **5**(4): 269~272
孟凡涛, 褚金奎, 韩志涛等. 亚波长金属光栅偏振器设计[J]. *纳米技术与精密工程*, 2007, **5**(4): 269~272

3 Zhang Liang, Li Chengfang. Polarization effect of 150 nm subwavelength aluminum wire grating in near infrared [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 467~471
张亮, 李承芳. 150 nm亚波长铝光栅的近红外偏振特性[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 467~471

4 Z. Y. Yang, M. Zhao, N. L. Dai *et al.*. Broad polarizers using dual-layer metallic nanowire grids[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(9): 697~699

5 She-Won Ahn, Ki-Dong Lee, Jin-Sung Kim *et al.*. Fabrication of a 50 nm half-pitch wire grid polarizer using nanoimprint lithography[J]. *Nanotechnology*, 2005, **16**: 1874~1877

6 Se Hyun Ahn, JinSung Kim, L. Jay Guo. Bilayer metal wire-grid polarizer fabricated by roll-to-roll nanoimprint lithography on flexible plastic substrate[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2007, **25**(6): 2388~2391

7 Zhaoning Yu, P. Deshpande, Wei Wu *et al.*. Reflective polarizer based on a stacked double-layer subwavelength metal grating structure fabricated using nanoimprint lithography [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(7): 927~929

8 Jianjim Wang, F. Walters, Xiaoming Liu *et al.*. High-performance, large area, deep ultraviolet to infrared polarizers based on 40 nm line/78 nm space nanowire grids [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(6): 061104

9 Jian Jim Wang, Lei Chen, Xiaoming Liu *et al.*. 30-nm-wide aluminum nanowire grid for ultrahigh contrast and transmittance polarizers made by UV-nanoimprint lithography [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(14): 141105

10 Z. Y. Yang, Y. F. Lu. Broadband nanowire-grid polarizers in ultraviolet visible near infrared regions[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(15): 9510~9519

11 Chihho Chiu, Huilung Kuo, Yichun Liu *et al.*. Wire grid polarizer with double metal layers[C]. United States Patent, 2007. 7158302

12 Y. Ekinci, H. H. Solak, C. David *et al.*. Bilayer Al wire-grids as broadband and high-performance polarizers[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(6): 2323~2334

13 Yuan Zhang, Yurong Jiang, Xia Li *et al.*. Polarization beam splitter based on dielectric periodic structure with different EFCs for two polarizations [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(10): 794~796

14 Jinlong Zhang, Xu Liu, Yiyu Li *et al.*. Polarization beam splitters based on one-dimensional metal-dielectric structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1788~1792
张锦龙, 刘旭, 厉以宇等. 基于一维金属-介质周期结构的偏振分束[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1788~1792

15 X. J. Yu, H. S. Kwok. Optical wire-grid polarizers at oblique angles of incidence[J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, **93**(8): 4407~4412

16 Liu Ying, Li Zhigang, Li Futian. Polarization characteristic of Al + MgF₂ film at VUV[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2002, **22**(5): 724~727
刘颖, 李志刚, 李福田. 真空紫外铝+氟化镁膜偏振特性的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2002, **22**(5): 724~727

17 M. G. Moharam, T. K. Gaylord. Rigorous coupled wave analysis of metallic surface-relief gratings[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1986, **3**(11): 1780~1787

18 M. G. Moharam, E. B. Grann, D. A. Pommet. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(5): 1068~1076