

可调谐型金属线栅偏振器的特性研究*

凌进中¹⁾ 黄元申^{1)2)†} 王中飞¹⁾ 王琦¹⁾²⁾ 张大伟¹⁾²⁾ 庄松林¹⁾²⁾

1) (上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

2) (上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093)

(2013年1月11日收到; 2013年2月14日收到修改稿)

金属线栅偏振器是一种新兴的基于微纳结构的光学偏振器件, 体积小、性能高、易集成. 但在紫外和可见光波段, 通过缩小线栅的特征尺寸来提高消光比的方法已经受到纳米制作工艺的限制, 因此需要新的结构来提高其偏振特性. 双层金属线栅结构仅在特定波段上提高器件的偏振特性. 在此基础上, 提出一种间距可调谐的金属线栅偏振器结构, 通过调谐两层金属线栅之间的距离来确保偏振器极高的消光比和很强的透过率. 利用 VirtualLab 软件的傅里叶模式方法, 计算了可调谐型金属线栅偏振的透过率和消光比. 数值仿真结果表明, 双层可调谐型金属线栅结构在整个紫外、可见光波段极大地提高了透射光的消光比和透过率.

关键词: 线栅偏振器, 可调谐结构, 消光比, 压电陶瓷

PACS: 42.79.Ci, 42.79.-e, 77.84.Cg

DOI: 10.7498/aps.62.144214

1 引言

金属线栅偏振器是一种基于微纳结构的光学偏振器件, 不但具有很好的偏振特性, 而且体积小、易集成, 能量利用率高, 已逐渐应用于 LCD 显示^[1]、偏振 LED^[2]、投影显示^[3]、偏振控制^[4,5] 等领域. 金属线栅偏振器是利用金属表面自由电子的振荡特性, 使得电场方向与线栅方向平行的横电 (TE) 偏振光能够激发电子沿线栅方向振荡, 从而发生反射; 而电场方向与线栅方向垂直的横磁 (TM) 偏振光由于周期性结构的限制无法激发自由电子振荡, 因此 TM 偏振光主要表现为透射特性.

金属线栅偏振器的性能指标通常用消光比系数 E_x 、总能量效率 TEE 以及 TM 波透过率 T_{TM} 来表示. 其中 T_{TM} 代表 TM 波的透射系数, 即 TM 波透射光强与 TM 波入射光强之比, 反映了透射光中 TM 波的利用率, 最理想的状态是 T_{TM} 等于 1; 消光比 E_x 定义为 TM 波的透过率与 TE 波的透过率之

比, 直接反映了透射光的偏振度, 是偏振器最重要的指标; TEE 表示反射光、透射光之和与入射光能量之比, 越接近 1 说明分束器的能量损失越小.

目前, 线栅偏振器在不断向深紫外^[6,7] 和太赫兹波段^[8] 拓展, 宽波段的线栅偏振器^[9,10] 已经成为设计和制作的热点. 制作的工艺^[11-13] 也在不断进步, Weber 等^[7] 利用超快电子束直写技术, 制作了周期 100 nm 的金属线栅偏振器, 其紫外波段 (中心波长 250 nm) 消光比能达到 15, 透过率能达到 42%. Wang 等^[11] 在金属线栅层的前后两面都增镀减反膜, 同时获得不错的消光比 (40 dB) 和透过率 (66.4%). 另外, Yang 等^[10] 在结构上也有所创新, 采用双层线栅结构, 即基片正反两面均制作了结构参数相同的金属线栅层, 能够极大地提高部分波段的消光比. 通过数值仿真发现, 双层金属线栅构成了类似的 Fabry-Perot (F-P) 腔结构, 周期性间隔的特定波长能在腔内发生谐振, 透过率明显增强, 因此特定波长具有较单层结构更高的消光比.

基于上述思想, 提出了一种可调谐^[14] 型金属

* 国家自然科学基金 (批准号: 60908021)、国家科技支撑计划 (批准号: 2011BAF02B04)、国家重大科学仪器设备开发专项 (批准号: 2011YQ15004004)、上海市教委曙光项目 (批准号: 11SG44)、上海市超精密光学加工与检测服务平台建设 (批准号: 11DZ2290301) 和上海市研究生创新基金 (批准号: JWCXSL1201) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: hyshyq@sina.com

线栅偏振器结构, 在两层金属线栅偏振器之间增加压电陶瓷^[15] (PZT) 支柱, 以调谐两层之间的距离. 改变 PZT 的驱动电压, 两金属线栅层之间的距离随之改变. 软件仿真计算发现, 随两层线栅间距的变化, TE 模、TM 模的透过率以及消光比都呈周期性变化, 并且其峰位置存在一定偏差. 因此, 对于任意单一的入射波长, 通过调谐线栅的间距可以寻找到最近位置, 使得透射光消光比系数达到最大值.

2 结构参数对偏振分光性能的影响

金属线栅偏振器的结构如图 1 所示, 主要结构参数有线栅周期 d 、金属线宽 w 以及线栅槽深 h . 不同槽形对线栅偏振器的性能也有一定的影响, 但变化趋势一致. 下文中均以矩形光栅为例, 讨论各种参数的影响. 除了结构参数外, 不同的金属材料的特性也有所不同. 根据参考文献 [10], 金属铝在可见光波段性能最好, 因此文中以金属铝为例.

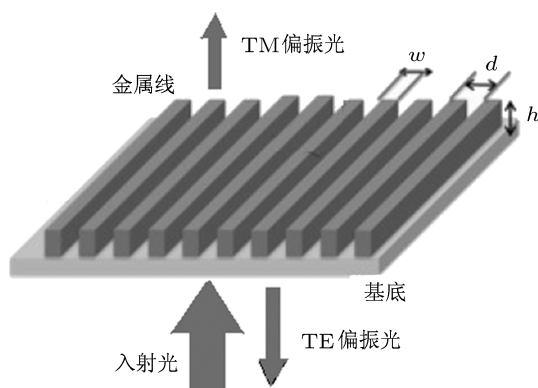


图1 单层金属线栅偏振器结构示意图

2.1 线栅周期对偏振性能的影响

利用 VirtualLab 软件光栅工具箱, 使用傅里叶模式方法 (FMM), 仿真分析金属线栅偏振器的透过率以及消光比. 假设线栅偏振器的基底为熔石英, 厚度为 3 mm, 线栅槽形为矩形, 占空比为 0.5, 线栅深度为 50 nm, 入射波长范围在 210 nm 至 1100 nm. 在 50 nm 到 200 nm 的范围内, 选取 4 个周期参数, 分析不同周期对应的偏振特性, 其性能如图 2 所示.

从图 2 中可以看出, 随着金属线栅周期的不断减小, 其消光比逐渐提高. 然而线栅周期的进一步缩小将受到制作工艺的限制. 当线栅周期为 200 nm 时, 对于入射波长 220 nm, 其消光比才只有 1.766, 因此单层很难满足紫外波段的应用.

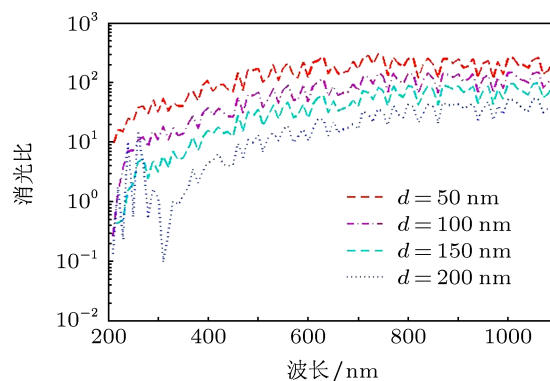


图2 不同周期线栅偏振器的特性

2.2 占空比对偏振性能的影响

占空比为金属线宽与线栅周期的比值. 根据上述参数, 将金属线栅周期定为 100 nm, 入射波长为 400 nm, 占空比从 0.1 至 0.9 变化, 其透过率和消光比随占空比的变化如图 3 所示.

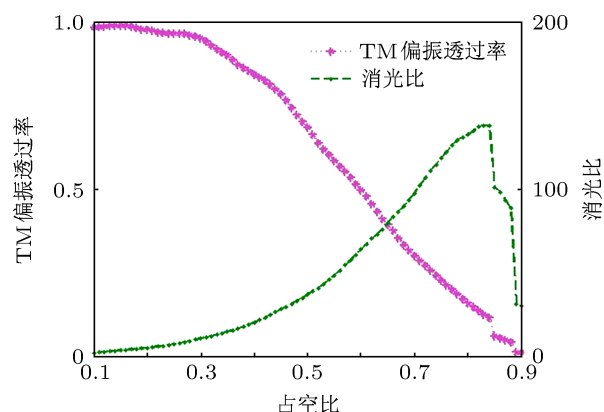


图3 不同占空比对偏振器性能的影响

由图 3 可以看出, 随着占空比的增加, TM 偏振光的透过率逐渐降低, 而消光比却随占空比的增加而增加. 因此, 对于固定周期的线栅偏振器来说, 消光比与 TM 透过率是一对矛盾量, 无法同时提高消光比和透过率, 需根据实际需求来确定占空比.

2.3 线栅槽深对偏振特性的影响

线栅槽深是又一重要的结构参数, 对 TM 波透过率和消光比都有很大的影响. 延续上述参数, 线栅周期定为 100 nm, 槽深变化从 20 nm 到 100 nm, 其 TM 透过率和消光比特性如图 4 所示. 随着槽深的增加, TM 偏振的透过率不断起伏, 总体是下降趋势, 而 TE 偏振的透过率却急速减小, 因此消光比急剧增大.

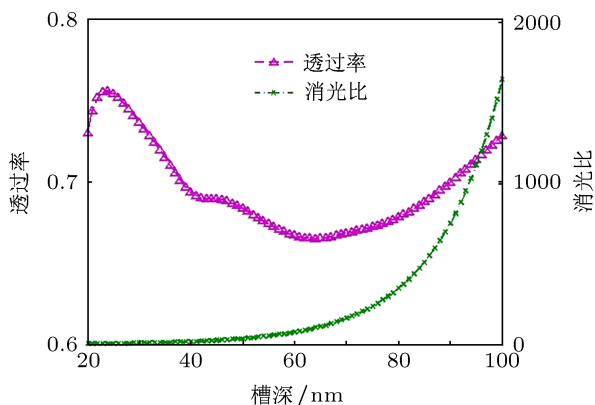


图4 不同槽深对偏振器性能的影响

3 可调谐金属线栅偏振器结构

通过上述仿真发现, 单层结构在紫外波段很难同时实现高的消光比和透过率. 若采用双层线栅结构, 如图 5 所示, 即线栅基底上下两面均有一层的金属线栅, 其结构参数与上文一致, 上下两层保持平行, 且线栅方向一致, 则其偏振特性如图 6 和图 7 所示. 从图中可以看出, 双层结构能够在部分波长提高线栅偏振器的消光比和透过率, 但是无法保证整个紫外及可见光波段内都具有很高的消光比和 TM 透过率, 不具备通用性. 另外, 制备过程中基底厚度的微弱误差都会使得偏振增强的波长发生漂移.

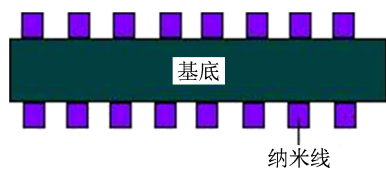


图5 双层金属线栅偏振器结构

基于双层线栅偏振器的思想, 提出一种可调谐型金属线栅偏振器结构, 如图 8 所示. 将两个完全相同的单层线栅偏振器做出一个夹心结构, 中间层为空气介质, 并且由压电陶瓷支撑, PZT 在可调谐驱动电压下伸缩, 从而导致上下两层线栅间距的调谐. 由于上下两层线栅组成了类似的 F-P 腔, 对特定波长发生谐振, 其 TM 透射得到增强, 而 TE 偏振透射没有增大, 因此其消光比大大增加. 对于另外一些波长, 其 TM 偏振没有透射增强, 而 TE 偏振发生谐振增强, 则其对应的消光比反而下降. 假设单层金属线栅的透过率为 T , 反射率为 R , 则经过谐振

腔后的透射率 T_c 可表示为

$$T_c = \frac{T^2}{(1-R)^2 + 4R\sin^2(\varphi/2)}, \quad (1)$$

其中 φ 为腔内相继反射的两束光的位相差, 可以表示为

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda}nh\cos\theta + 2\delta, \quad (2)$$

其中 λ 为入射波长, n 为谐振腔内介质的折射率, θ 为入射角, δ 为光在金属线栅层反射时产生的位相移动, 其大小与入射光的偏振态有关.

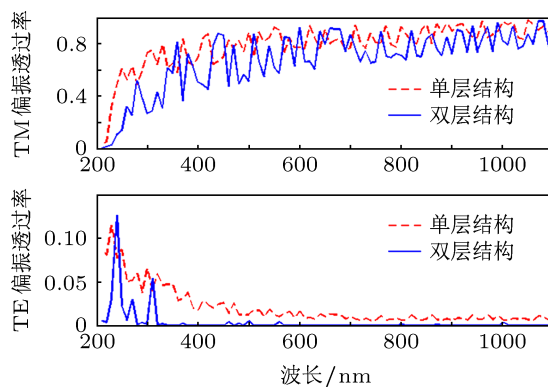


图6 单、双层线栅结构透过率比较

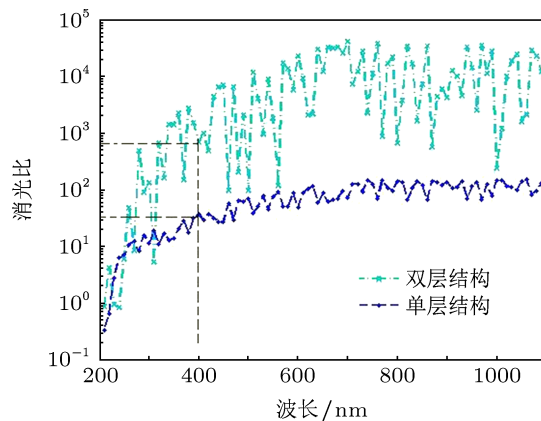


图7 单、双层线栅结构消光比系数比较



图8 可调谐金属线栅偏振器结构 1, 线栅基底; 2, 金属线栅; 3, 压电陶瓷支柱

通过 PZT 调谐空气层的厚度, 即 F-P 腔的间距, 从而改变谐振波长, 即调谐偏振增强的波长, 以满足不同入射波长的需要. 假设空气层的初始厚度为 3 mm, PZT 位移范围为 0.5 μm , 精度为 5 nm, 入射

波长为 400 nm, 则其偏振特性如图 9 所示.

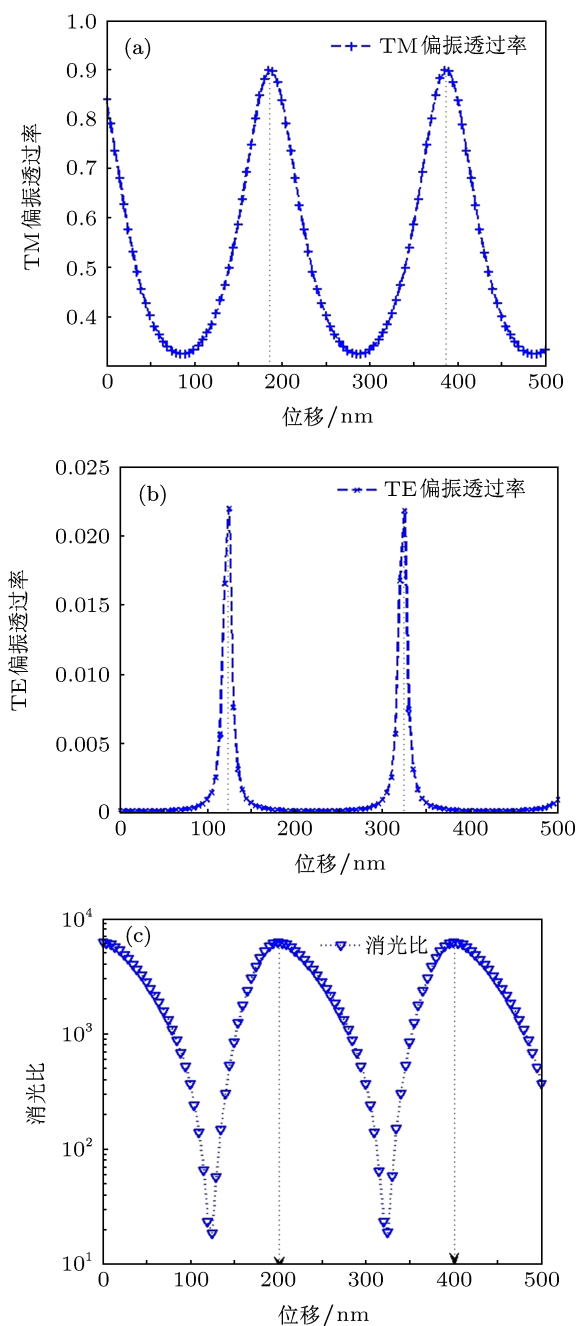


图 9 可调谐结构的偏振特性

图 9(a) 为 TM 偏振光经过可调谐线栅结构后的透过率曲线, 其透过率随 PZT 的伸缩呈周期性变化, 其谐振峰值在压电陶瓷的 185 nm 位移处和 385 nm 处, 即每移动 200 nm, 就可获得一个 TM 透射峰值. 图 9(b) 为 TE 偏振光的透过率曲线, 随 PZT 伸缩同样呈周期性变化, 且周期同样为 200 nm, 但峰值位置略有漂移, 在 125 nm 和 325 nm 处, 这是由于 TE 偏振和 TM 偏振在金属表面反射时产生的

位相变化略有不同, 因此谐振峰值略有不同. 根据图 9(a) 和 (b) 可计算出消光比的周期性变化, 如图 9(c) 所示, 消光比的峰值在 200 nm 和 400 nm 位置, 峰值处消光比系数可以达到 6000 倍, 较单层线栅结构的 31 倍和双层结构的 1470 倍 (见图 7) 均有很大的提高. 为更好地说明可调谐结构较双层结构在整个紫外波段的优化效果, 在紫外波段 210 nm 至 380 nm 每隔 10 nm 选取一点, 计算其透过率和消光比, 计算结果如图 10 所示. 从图 10 中可以看出, 在整个紫外波段, 可调谐结构都能够有效改善双层结构的性能, 特别是透过率参数. 因此, 可调谐结构能够应用于深紫外波段, 在单层结构无法同时实现高消光比和透过率时, 利用双层可调谐结构能够将应用波段向短波方向拓展而无须更小的线栅参数.

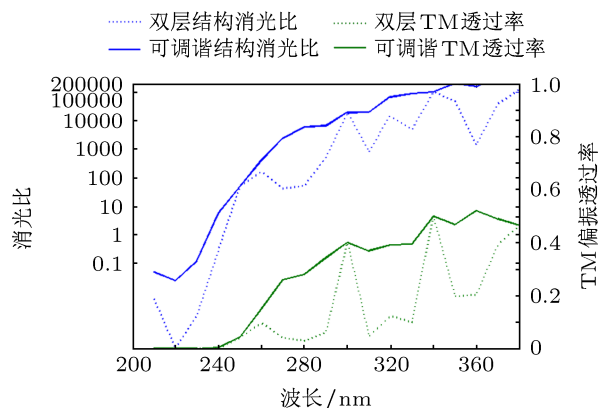


图 10 可调谐结构与双层线栅结构的消光比及透过率比较

4 结论

为解决单层金属线栅结构难以在紫外波段实现较高的消光比和透过率, 提出了一种可调谐双层线栅结构, 以获取更高的偏振特性. 通过数值仿真发现, 单层金属线栅偏振器结构在紫外可见波段的偏振消光比很低; 而双层结构能够局部改善部分波段的偏振效果, 却无法满足不同紫外、可见光波段, 并且消光比增强的波长容易受到线栅基底厚度误差的影响, 不易精确控制; 基于 PZT 的可调谐双层线栅结构, 能够通过调谐双层线栅间的间距来寻找消光比和透过率的最大值, 较双层结构有很大改善. 因此, 可调谐结构能够应用于单层结构以及双层结构无法实现的短波区域, 为线栅偏振器件向紫外波段拓展提供一种思路.

- [1] Ge Z, Wu S T 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 121104
 [2] Yao P H, Chung C J, Wu C L, Chen C H 2012 *Opt. Express* **20** 4819
 [3] Yu X J, Kowk H S 2003 *Appl. Opt.* **42** 6335
 [4] Chuss D T, Wollack E J, Henry R 2012 *Appl. Opt.* **51** 197
 [5] Kim D 2005 *Appl. Opt.* **44** 1366
 [6] Weber T, Kasebier T, Kley E B 2011 *Opt. Lett.* **36** 445
 [7] Weber T, Fuchs H J, Schmidt H, Kely E B 2009 *Proc. SPIE* **7205** 720504
 [8] Takano K, Yokoyama H, Ichii A 2011 *Opt. Lett.* **36** 2665
 [9] Wang J J, Walters F, Liu X, Sciortino P, Deng X G 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 061104
 [10] Yang Z Y, Lu Y F 2007 *Opt. Express* **15** 9510
 [11] Wang J J, Zhang W, Deng X G, Deng J D, Liu F, Sciortino P, Chen L 2005 *Opt. Lett.* **30** 195
 [12] Pelletier V, Asakawa K, Wu M 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 211114
 [13] Chen L, Wang J J, Walters F 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 063111
 [14] Wang Q, Zhang D W, Huang Y S, Ni Z J, Chen J B, Zhong Y W, Zhuang S L 2010 *Opt. Lett.* **35** 1236
 [15] Yang W W, Wen Y M, Li P, Bian L X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4545 (in Chinese) [杨伟伟, 文玉梅, 李平, 卞雷祥 2008 物理学报 **57** 4545]

Research on the characteristics of tunable structure nanowire-grid polarizer*

Ling Jin-Zhong¹⁾ Huang Yuan-Shen^{1)2)†} Wang Zhong-Fei¹⁾ Wang Qi¹⁾²⁾
 Zhang Da-Wei¹⁾²⁾ Zhuang Song-Lin¹⁾²⁾

1) (School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

2) (Shanghai Key Laboratory of Modern Optics System, Shanghai 200093, China)

(Received 11 January 2013; revised manuscript received 14 February 2013)

Abstract

Nanowire-grid polarizer is of a periodic sub-wave structure of metallic nanowire on the substrate, fabricated by nanoimprint technology. Different from traditional polarization prism and dichroic polarizer, the nanowire-grid polarizer has many advantages such as compact size, easy integration and high polarization performance. However, in the ultraviolet and visible regions, it is infeasible to improve the performance of single layer nanowire structure by reducing the character size of nanowire because of the bottleneck of lithographic process. The double-layer nanowire-grid structure could improve the polarization characteristics at some special wavelengths but not full-wave band of ultraviolet and visible regions. In this paper, we propose a tunable double-layer structure to enhance the extinction ratio and transmission at each wavelength by tuning the distance between two nanowire-grid polarizers through adjusting the voltage applied to PZT. To calculate the transmittance and transmission extinction ratio of tunable structure, software VirtualLab is employed and the Fourier model method is used. The numerical simulation results show that the tunable structure have a higher polarization characteristic in ultraviolet and visible regions than single layer structure and double layers structure.

Keywords: nanowire-grid polarizer, tunable structure, extinction ratio, PZT

PACS: 42.79.Ci, 42.79.-e, 77.84.Cg

DOI: 10.7498/aps.62.144214

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60908021), National Key Technologies R&D Program of China (Grant No. 2011BAF02B04), the National Science Instrument Important Project of China (Grant No. 2011YQ15004004), the "Dawn" Program of Shanghai Education Commission, China (Grant No. 11SG44), the Shanghai Ultra-Precision Optical Manufacture and Testing Center, China (Grant No. 11DZ2290301), and the Innovation Fund Project for Graduate Student of Shanghai, China (Grant No. JWCXSL1201).

† Corresponding author. E-mail: hyshyq@sina.com