文章编号：1005-5630(2025)05-0062-08　　**DOI**: 10.3969/j.issn.1005-5630.202412230111

DUV 波段高消光比的反常偏振光栅研究

栗梦晗，胡海峰，张　妮，刘远远，刘家辰
（上海理工大学 光电信息与计算机工程学院，上海 200093）

摘要：基于共振域光栅的反常偏振效应，设计了一种以熔石英(SiO_2)为衬底，铝(Al)金属作为栅线材料的金属光栅。该光栅具备透射 TE 偏振光和反射 TM 偏振光的反常偏振特性，光栅周期为 261 nm，该数值接近目标入射波长 266 nm。当光源垂直入射到该光栅时，TE 偏振光的透射率可达 82%，消光比可达 220。为了进一步提高光栅的消光比，在 SiO_2 衬底上添加一层介质，选用 Al_2O_3 和 Si_3N_4 作为介质层材料，通过模拟结果分析，当 Al_2O_3 作为介质层材料时，光栅的消光比达到 240；当 Si_3N_4 作为介质层材料时，光栅的消光比则提高至 396。同时，TE 偏振光的透射率均超过 60%。该反常偏振光栅在光刻机偏振系统、光滤波等领域具有广泛的应用潜力。

关键词：深紫外波段；共振域光栅；反常偏振效应；光栅偏振器件；消光比
中图分类号：TN 253　**文献标志码**：A

Research on anomalous polarization gratings with high extinction ratio in the DUV band

LI Menghan，HU Haifeng，ZHANG Ni，LIU Yuanyuan，LIU Jiachen
（School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China）

Abstract: Utilizing the anomalous polarization effect of resonant domain gratings, in this paper, we developed a metallic grating with fused silica (SiO_2) as the substrate and aluminum (Al) as the metal for the grating lines. The grating demonstrates unusual polarization properties for transmitted TE-polarized light and reflected TM-polarized light, with a period of 261 nm, near the incident wavelength of 266 nm. When the light source is vertically incident to the grating, the transmittance of TE polarized light can achieve 82%, and the extinction ratio can reach 220. In order to further improve the extinction ratio of the grating, in this paper, a layer of medium is added on the SiO_2 substrate, and Al_2O_3 and Si_3N_4 are selected as the medium layer materials. Analysis of the simulation results indicates that when Al_2O_3 is employed as the dielectric layer material, the grating's extinction ratio reaches 240. When Si_3N_4 is used, the extinction ratio rises to 396. Additionally, the transmittance of TE-polarized light consistently exceeds 60%. The anomalously

收稿日期：2024-12-23
第一作者：栗梦晗 (1999—)，女，硕士研究生，研究方向为纳米光子学。E-mail：223330680@st.usst.edu.cn
通信作者：刘家辰 (1995—)，女，讲师，研究方向为纳米光子学。E-mail：liujiachen@usst.edu.cn

polarized grating has a wide range of potential applications in photolithography polarization systems, optical filtering, and other fields.

Keywords: deep ultraviolet region; resonant domain gratings; anomalous polarization effect; grating polarization devices; extinction ratio

自光栅的双折射特性被发现以来，这一特性在光学领域引起了广泛关注，并成功应用于多种重要偏振器件的开发，如线栅偏振器[1]、偏振分束器[2]和径向偏振器[3]等。特别是亚波长金属光栅偏振器，利用金属表面自由电子的振荡特性来实现偏振，能够透射 TM 偏振光(电矢量垂直于光栅线的偏振光)，而反射和吸收 TE 偏振光(电矢量平行于光栅线的偏振光)[4]，这类光栅的周期远小于入射波长，不仅体积小、易于集成，还具有优良的偏振性能，因此广泛应用于可见光和红外波段的研究[5-9]。

随着纳米制备技术的快速发展与突破，金属线栅偏振器的研究逐渐向深紫外(deep ultraviolet，DUV)波段延伸。由于深紫外波段的特征波长显著缩短，这对金属线栅偏振器的结构参数提出了更为严格的要求，特别是光栅周期需要进一步缩小，以实现对深紫外光的有效调制。2007 年，Wang 等[10]提出了一种适用于 266 nm 波长下的铝光栅偏振器，其周期仅为 118 nm，TM 偏振光的透射率达到了 65%，消光比约为 200。2011 年，Weber 等[11]设计了一种周期为 100 nm 的铱线栅偏振器，在 250 nm 波长下 TM 偏振光的透射率约为 45%，消光比约为 87。2012 年，Weber 等[12]又设计了一种周期为 100 nm 的钨线栅偏振器，在 193 nm 波长下 TM 偏振光的透射率为 40%，消光比为 22。在深紫外波段的研究中，研究者们甚至提出了周期更小的光栅设计方案，这不仅增加了制备工艺的技术难度，其偏振性能也难以达到理想水平[13-14]。

1999 年，Honkanen 和 Drauschke 等在亚波长金属光栅(SWMGs)的共振域发现了一种反常偏振现象：光栅能够透射 TE 偏振光，而反射和吸收 TM 偏振光，且周期接近入射波长[15-16]。这一发现解决了亚波长金属光栅在深紫外波段周期偏小的问题。2011 年，Kang 等[17]利用这种反常偏振效应，提出了周期为 176 nm 的铝光栅，该光栅在 193 nm 波长下 TE偏振光的透射率接近 40%，消光比约为 45。2013年，Kang 等[18]进一步提出了一种周期为 170 nm 的混合型 Al−SiO_2 光栅，其消光比可达到 3 000 以上，但在 196 nm 波长下 TE 偏振光的透射率仅为 30% 左右。2019 年，张冲等[19]提出了一种周期为 178 nm 的 MgF_2–Al 光栅偏振器，在 193 nm 波长下 TE 偏振光的透射率超过 60%，消光比大于 180，与相同结构的单层铝光栅相比，透射率提升了约 10%，消光比提升了 4.5 倍。2020 年，吴芳等[20]提出了一种周期为 180 nm 的双层金属偏振器，在 193 nm波长下 TE 偏振光的透射率为 56.8%，消光比可达 65.6 dB。此外，研究者们还对亚波长金属光栅的透射机理进行了深入研究，基于严格耦合波理论分析了光栅参数对偏振性能的影响，并证明了类法布里−帕罗共振对光透射的增强作用以及对透射光谱的调制作用，同时指出了金属材料、金属线栅的周期和厚度对亚波长金属光栅在共振波长处的异常偏振现象的调制作用[21-25]。

随着集成电路制造技术的飞速发展，对光刻分辨率的要求不断提升，目前提高光刻分辨率的有效途径主要集中在两个方面：减小曝光波长[26]和增大数值孔径(numerical aperture, NA)[19]。曝光光源的发展进程已从近紫外波段逐步过渡到 DUV 波段，其中 193 nm波长已成为光刻技术中主要的曝光光源[27-29]，相比于在 193 nm 波长下研究的偏振光栅，针对 266 nm 波长的相关研究较为匮乏，反常偏振光栅更是如此。因此，本文依据共振域光栅的反常偏振效应，提出了一种工作在 266 nm 波长下的透射式反常偏振金属光栅偏振器，采用熔石英(SiO_2)作为衬底，铝(Al)作为光栅栅线材料。为进一步提高光栅的消光比，本文选用在深紫外波段具有低折射率、高透过率的氧化铝(Al_2O_3)和氮化硅(Si_3N_4)作为介质层材料[30]，并分析其厚度变化对光栅消光比的

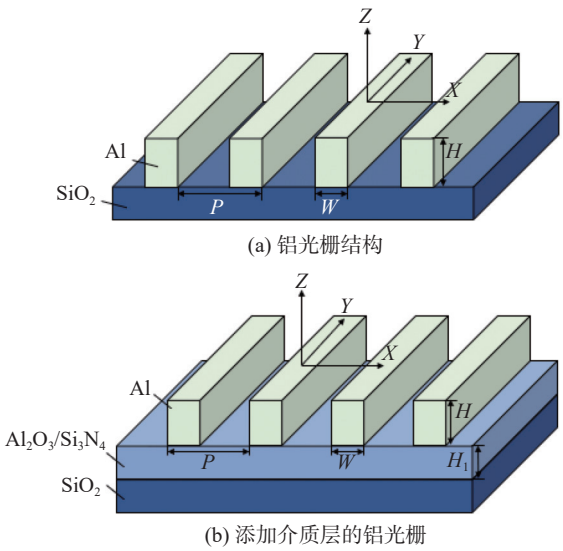
影响。该光栅偏振器在光刻机曝光系统中能够有效控制和检测偏振参数，确保光刻成像质量，同时可以实现偏振检测系统的小型化，且接近入射波长，易于制作的同时又可以保持较高的偏振特性，也可在光学滤波[31] 等领域广泛应用。

1　光栅的结构设计

基于共振域光栅的反常偏振效应，本文采用基于严格耦合波理论的商业仿真软件 Rsoft 设计一种铝反常偏振光栅偏振器，并对光栅的关键参数进行仿真优化，使其具有高的消光比，结构如图 1(a)所示。光栅的工作波长为 266 nm，光源沿 Z 轴垂直入射，入射光分为 TE 偏振光(电场方向平行于栅线)和 TM 偏振光(电场方向垂直于栅线)。光栅结构参数包括：光栅周期 P，金属栅线宽度 W，占空比 W/P，金属栅线高度 H，介质层厚度为 H_1，光栅消光比(EXT)定义为 TE 偏振光和 TM 偏振光的透射率之比

$$EXT = \frac{T_{\mathrm{TE}}}{T_{\mathrm{TM}}} \tag{1}$$

式中：T_{TE} 为 TE 偏振光的透射率；T_{TM} 为 TM 偏振光的透射率。



(a) 铝光栅结构

(b) 添加介质层的铝光栅

图 1　光栅结构图

Fig. 1　Diagram of aluminum grating structure

熔石英(SiO_2)、氟化镁(MgF_2)和氟化钙(CaF_2)晶体是 DUV 波段常用的衬底材料。在 266 nm 波长下，SiO_2 材料的折射率 n_{SiO_2} = 1.499 7+0 i，MgF_2 材料的折射率 n_{MgF_2} =1.462 1+0.001 3 i。当衬底达到一定厚度时，由于 MgF_2 折射率具有消光系数，对光产生的吸收作用不可忽视，会导致光栅的透射率降低。相比之下，SiO_2 不存在消光系数，其厚度的变化对光的透射率影响相对较小；而 CaF_2 的加工难度较大且成本高，因此本文最终选择 SiO_2 作为衬底材料。在光栅材料方面，本文选用铝金属，相较于金、银等贵金属，铝具备较宽的等离子体工作波长范围，是最合适的材料之一，此外，铝还具有高的等离子体频率，尤其在深紫外波段能够展现出明显的表面等离子体共振效应[32]，使铝具备优良的偏振性能，综合以上因素，选择铝作为栅线材料。

为进一步提高铝反常偏振光栅的消光比，在衬底与铝层之间添加一层介质层，结构如图 1(b)所示。介质层材料分别使用 Al_2O_3 和 Si_3N_4 进行仿真模拟，氧化铝在紫外至中红外波段具有透明度高、吸收小等优点，而氮化硅也同样具有高的透明度和低的折射率[31]。

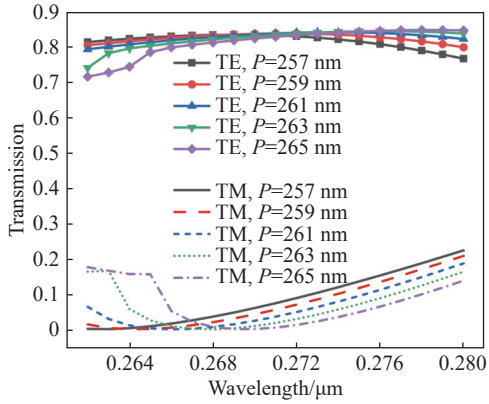
2　光栅的参数优化

2.1　周期对光栅偏振性能的影响

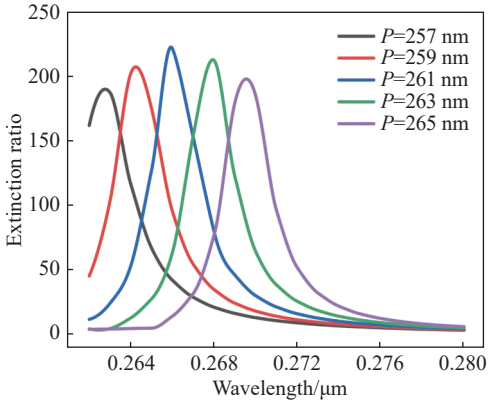
光栅周期(P)对 TE 偏振光和 TM 偏振光的透射率以及消光比的影响如图 2 所示。设置结构参数 W = 119 nm、H = 192 nm。图 2(a)展示了光栅透射率随光栅周期 P 的变化关系，在 266 nm 波长处，随着周期 P 的变化，TE 偏振光的透射率呈减小趋势，而 TM 偏振光的透射率则表现出先减小后增加的趋势。图 2(b)展示了光栅消光比与光栅周期 P 之间的关系，综合考虑，对于目标波长 266 nm，选择周期 P = 261 nm，此时 TE 光的透射率达到了 82%，光栅的消光比达到最大值 220，周期 P 的容差范围约为±5 nm。

2.2　栅线宽度对光栅偏振性能的影响

金属线栅宽度(W)对 TE 偏振光和 TM 偏振光透射率以及消光比的影响如图 3 所示。光栅结构可等效为由多个金属−介质−金属周期性单元构成的波导阵列，其中每个单元均可视为一个类法布里−珀罗(Fabry−Perot，FP)谐振腔，其谐振



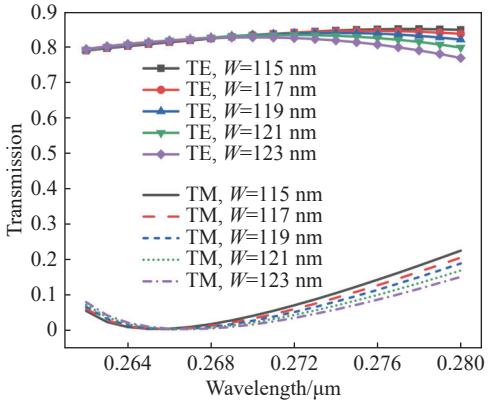
(a) TE 偏振光和 TM 偏振光的透射率曲线



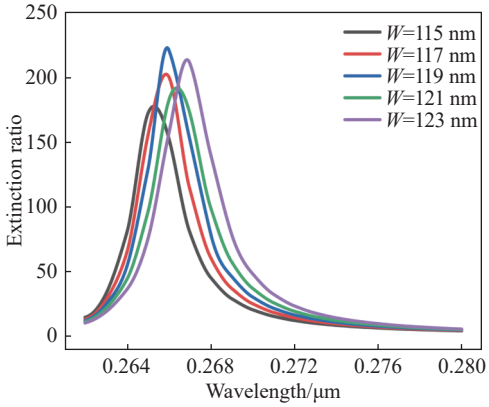
(b) 消光比曲线

图 2　光栅周期 *P* 对单层 Al 光栅透射率以及消光比的影响

Fig. 2　The effect of the grating period *P* on the transmission and extinction ratio of the single-layer Al grating



(a) TE 偏振光和 TM 偏振光的透射率曲线



(b) 消光比曲线

图 3　光栅栅线宽度 *W* 对单层 Al 光栅透射率以及消光比的影响

Fig. 3　The effect of the Al grating line width *W* on the transmission and extinction ratio of the single-layer Al grating

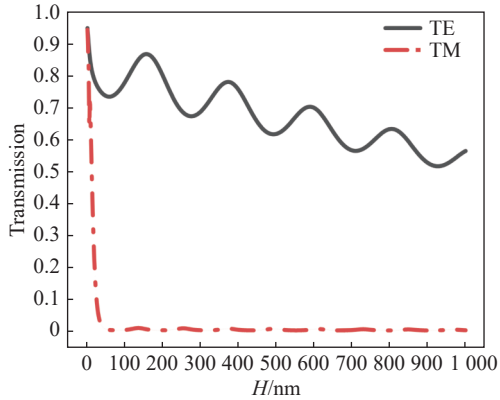
介质为空气层。电磁波在这些狭缝中传播时，狭缝内产生表面等离子体在共振腔的作用下使透射光谱产生周期性变化。当 P=261 nm、H=192 nm 时，线栅宽度 W 的变化影响光栅的占空比，进而改变共振腔内表面等离子体的共振波长，导致入射偏振光的透射率及消光比发生相应的变化[25]。如图 3(a)所示，在 266 nm 波长处，TE 和 TM 偏振光透射率对线栅宽度 W 的变化不敏感，结合消光比随线栅宽度的变化，当 W=119 nm 时，消光比在 266 nm 处出现峰值，此时光栅的偏振性能最佳，容差范围约为±16 nm。

2.3　铝栅线高度对光栅偏振性能的影响

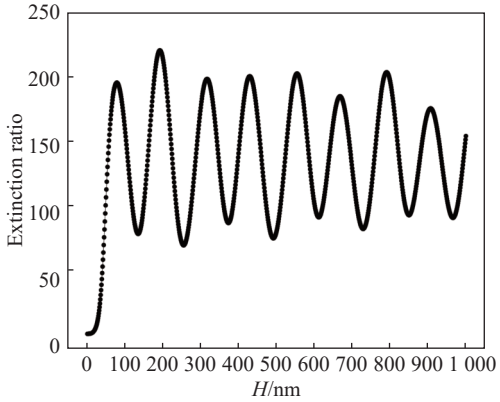
铝栅线高度(H)对 TE 偏振光和 TM 偏振光透射率以及消光比的影响如图 4 所示。设置参数 P=261 nm、W=119 nm。如图 4(a)所示，TE 偏振光的透射率随着铝栅线高度的增加呈现震荡衰减趋势，而 TM 偏振光的透射率则先以指数型下降，随后呈现周期性震荡衰减。这是由于铝的厚度决定了金属−空气−金属构成的类 F-P 共振腔的腔长，进而影响了与腔内介质和入射波长相匹配的共振模数[18]。随着铝栅线高度的增大，光的透射率出现周期性震荡。此外，金属对光波有吸收作用，随着铝栅线高度的增大，损耗也随之增加，导致透射曲线呈现下降趋势，因此 TE 偏振光和 TM 偏振光的透射率均呈周期性衰减。消光比随着铝栅线高度的变化如图 4(b)所示，也呈现周期性震荡，结合 TE 偏振光和 TM 偏振光透射率，取消光比最大时的铝栅线高度 H=192 nm。

2.4　介质层厚度对光栅偏振性能的影响

光栅介质层厚度(H_1)对 TE 偏振光和 TM 偏振光透射率以及消光比的影响如图 5 所示，在



(a) TE 偏振光和 TM 偏振光的透射率曲线



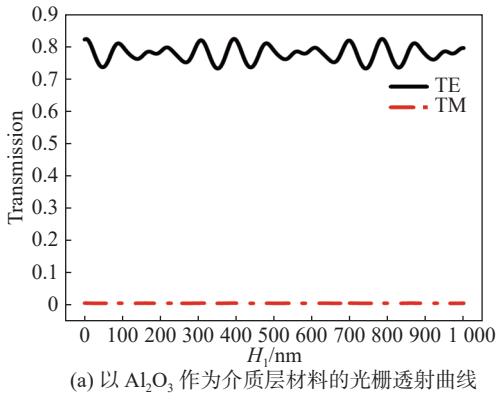
(b) 消光比曲线

图 4　栅线高度 *H* 对单层 Al 光栅透射率以及消光比的影响

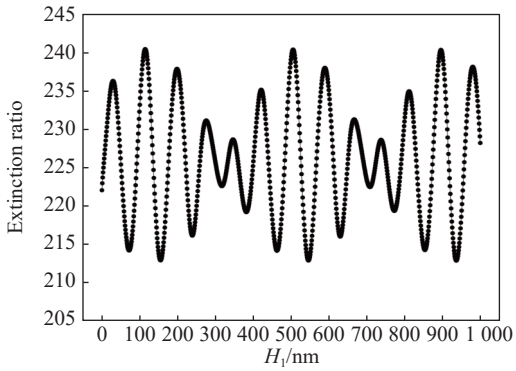
Fig. 4　The effect of the Al grating line height *H* on the transmission and extinction ratio of the single-layer Al grating

仿真优化中，分别使用 Al_2O_3 和 Si_3N_4 作为介质层材料。设置参数 P = 261 nm、W = 119 nm、H = 192 nm。

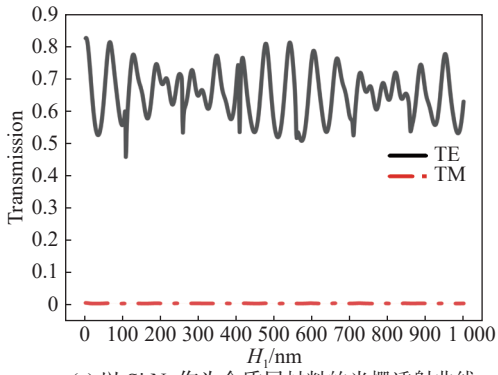
从图中可以看出，随着介质层厚度的增加，TE 偏振光的透射率表现为周期性震荡变化，而 TM 偏振光透射率的变化则比较平缓。如图 5(a)和(b)所示，当 Al_2O_3 作为介质层材料时，TE 偏振光透射率呈现周期性稳定变化，因此消光比也呈周期性变化，且均保持在 210 以上，并在 H_1 (Al_2O_3) = 115 nm 时达到最大值 240，此时 TE 偏振光透射率约为 78%；如图 5(c)和(d)所示，当 Si_3N_4 作为介质层材料时，由于 Si_3N_4 的折射率大于衬底的折射率，TE 偏振光透射率呈现周期性振荡衰减。与此同时，消光比随 Si_3N_4 厚度的增加呈震荡变化，且均高于 220，在 H_1 (Si_3N_4) = 152 nm 时达到最大值 396，此时，对应的 TE 偏振光透射率为 64.3%。



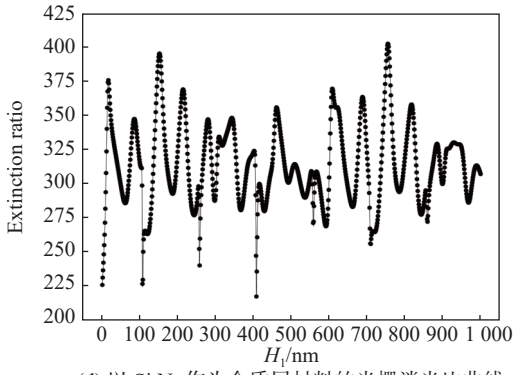
(a) 以 Al_2O_3 作为介质层材料的光栅透射曲线



(b) 以 Al_2O_3 作为介质层材料的光栅消光比曲线



(c) 以 Si_3N_4 作为介质层材料的光栅透射曲线



(d) 以 Si_3N_4 作为介质层材料的光栅消光比曲线

图 5　介质层厚度 H_1 对 Al 光栅透过率以及消光比的影响

Fig. 5　The effect of the dielectric layer thickness H_1 on the transmission and extinction ratio of the grating

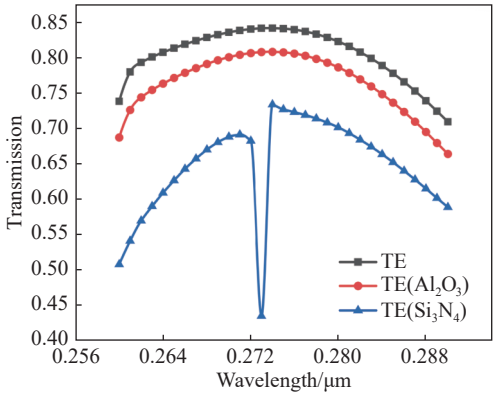
根据菲涅尔公式，如式(2)和式(3)所示，在衬底上加一层折射率低于衬底材料的介质层，可以提高光栅的透射率；反之，则会降低光栅的透射率。

$$t_s = \frac{2n_1\cos\theta_1}{n_1\cos\theta_1 + n_2\cos\theta_2} \tag{2}$$

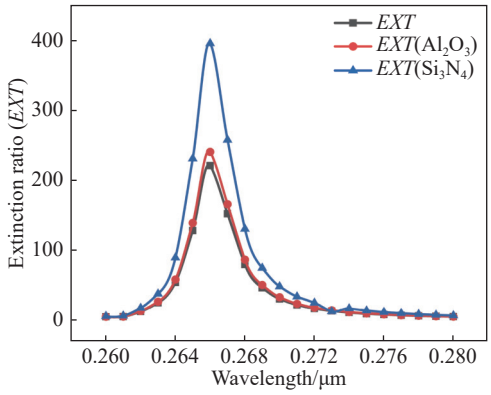
$$t_p = \frac{2\theta_1\cos\theta_1}{n_2\cos\theta_1 + n_1\cos\theta_2} \tag{3}$$

式中：n_1 为入射介质折射率；n_2 为出射介质折射率。

在 266 nm 波长下，Al_2O_3 材料的折射率为 $n_{Al_2O_3}$=1.702 2+0.000 016 i，Si_3N_4 材料的折射率为 $n_{Si_3N_4}$=2.221 92+0.000 802 i，而衬底 SiO_2 的折射率为 n_{SiO_2}=1.499 7。如图 6(a)所示，由于这两种介质材料的折射率均高于衬底的折射率，TE 偏振光透射率有所降低，但仍均保持在 60%以上。另外，在以 Si_3N_4 为介质的 TE 偏振光透射曲线中，273 nm 处 TE 偏振光透射率骤然降低，是由于在该波长下产生了类电磁诱导透明效应，金属光栅结构类似于耦合模式理论中的亮态，而 Si_3N_4 层与外界的光耦合较弱，则是充当暗态，电磁场在亮态和暗态之间来回耦合，在氮化硅层产生相消干涉，从而引起此处透射率突然下降[33-34]。此外，消光比的对比如图 6(b)所示，增加介质层后光栅的消光比均高于单层铝光栅的消光比。



(a) 透射率的对比



(b) 消光比的对比

图 6　增加介质层前后光栅的透射率和消光比对比

Fig. 6　Comparison of the transmission and extinction ratio of grating with and without dielectric layers

3　结　论

本文基于共振域光栅的反常偏振效应，使用基于严格耦合波理论的光学仿真软件 Rsoft 设计并优化了以 SiO_2 为衬底的铝反常偏振光栅偏振器，光栅周期为 261 nm，线栅宽度为 119 nm，线栅高度为 192 nm。在 DUV 波段(266 nm)，单层 Al 光栅的 TE 偏振光透射率可达到 80%，消光比为 220。为提高光栅的消光比，在衬底上添加了一层介质层，分别模拟了 Al_2O_3 和 Si_3N_4 两种介质材料。模拟结果显示，这两种材料分别将光栅的消光比提升至 240 和 396，显著提高了光栅的消光比，同时 TE 偏振光的透射率均超过 60%。该光栅在深紫外波段可以实现高消光比和高透射率，对于偏振控制和检测非常重要，可应用于光刻机偏振系统中，实现光刻机偏振系统检测装置小型化，也可用于光学滤波等领域。此外，该光栅的周期接近入射波长，便于光栅偏振器件的加工。

参考文献：

[1] WOOD R W. On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum[J]. Proceedings of the Physical Society of London, 1902, 18(1): 269 – 275.

[2] 张蒙恩, 王文涛, 刘平安, 等. 亚波长线栅太赫兹偏振分束器的研究 [J]. 激光技术, 2013, 37(3): 297 – 300.

[3] 谭巧, 徐启峰, 谢楠. 亚波长径向偏振光栅的设计 [J]. 光电工程, 2017, 44(3): 345 – 350.

[4] RICHTER I, SUN P C, XU F, et al. Design considerations of form birefringent microstructures[J]. Applied Optics, 1995, 34(14): 2421 – 2429.

[5] XU M, URBACH H P, DE BOER D K G, et al. Wire-

grid diffraction gratings used as polarizing beam splitter for visible light and applied in liquid crystal on silicon[J]. Optics Express, 2005, 13(7): 2303 – 2320.

[6] SASAKI T, KUSHIDA H, SAKAMOTO M, et al. Liquid crystal cells with subwavelength metallic gratings for transmissive terahertz elements with electrical tunability[J]. Optics Communications, 2019, 431: 63 – 67.

[7] NGUYEN D M, LEE D, RHO J. Control of light absorbance using plasmonic grating based perfect absorber at visible and near-infrared wavelengths[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 2611.

[8] DAI M, WAN W W, ZHU X Y, et al. Broadband and wide angle infrared wire-grid polarizer[J]. Optics Express, 2015, 23(12): 15390 – 15397.

[9] YANG Z Y, LU Y F. Broadband nanowire-grid polarizers in ultraviolet-visible-near-infrared regions[J]. Optics Express, 2007, 15(15): 9510 – 9519.

[10] WANG J J, WALTERS F, LIU X M, et al. High-performance, large area, deep ultraviolet to infrared polarizers based on 40 nm line/78 nm space nanowire grids[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(6): 061104.

[11] WEBER T, KÄSEBIER T, SZEGHALMI A, et al. Iridium wire grid polarizer fabricated using atomic layer deposition[J]. Nanoscale Research Letters, 2011, 6(1): 558.

[12] WEBER T, KÄSEBIER T, HELGERT M, et al. Tungsten wire grid polarizer for applications in the DUV spectral range[J]. Applied Optics, 2012, 51(16): 3224 – 3227.

[13] ASANO K, YOKOYAMA S, KEMMOCHI A, et al. Fabrication and characterization of a deep ultraviolet wire grid polarizer with a chromium-oxide subwavelength grating[J]. Applied Optics, 2014, 53(13): 2942 – 2948.

[14] SIEFKE T, KROKER S, PFEIFFER K, et al. Materials pushing the application limits of wire grid polarizers further into the deep ultraviolet spectral range[J]. Advanced Optical Materials, 2016, 4(11): 1780 – 1786.

[15] HONKANEN M, KETTUNEN V, KUITTINEN M, et al. Inverse metal-stripe polarizers[J]. Applied Physics B, 1999, 68(1): 81 – 85.

[16] DRAUSCHKE A, SCHNABEL B, WYROWSKI F. Comment on the inverse polarization effect in metal-stripe polarizers[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2001, 3(1): 67 – 71.

[17] KANG G G, VARTIAINEN I, BAI B F, et al. Inverse polarizing effect of subwavelength metallic gratings in deep ultraviolet band[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(7): 071103.

[18] KANG G, RAHOMÄKI J, DONG J, et al. Enhanced deep ultraviolet inverse polarization transmission through hybrid Al-SiO_2 gratings[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(13): 131110.

[19] 张冲, 胡敬佩, 周如意, 等. 深紫外光栅反常偏振器件的设计与分析 [J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0301005.

[20] 吴芳, 步扬, 刘志帆, 等. 深紫外双层金属光栅偏振器的设计与分析 [J]. 物理学报, 2021, 70(4): 044203.

[21] 王志文, 褚金奎, 王倩怡. 单层亚波长金属光栅偏振器透射机理研究 [J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0705002.

[22] 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.

[23] 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.

[24] 刘镜, 刘娟, 王涌天, 等. 亚波长金属光栅的表面等离子体激元共振特性 [J]. 中国光学, 2011, 4(4): 363 – 368.

[25] 何启浩, 汪国平. 一维金属光栅的透射光增强效应的物理机制 [J]. 激光杂志, 2003, 24(4): 29 – 30.

[26] 常艳贺, 金春水, 李春, 等. 深紫外氧化物薄膜的光学特性 [J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1207004.

[27] RONSE K G, GOETHALS A M, VANDENBERGHE G, et al. Recent trends and progress in deep-UV lithography[C]//Proceedings of SPIE 3741, Lithography for Semiconductor Manufacturing. Edinburgh: SPIE, 1999: 34 – 39.

[28] ZACZEK C, MÜLLENDER S, ENKISCH H, et al. Coatings for next generation lithography[C]// Proceedings of SPIE 7101, Advances in Optical Thin Films III. Glasgow: SPIE, 2008: 71010X.

[29] FINDERS J, DUSA M, NIKOLSKY P, et al. Litho and patterning challenges for memory and logic applications at the 22-nm node[C]//Proceedings of SPIE 7640, Optical Microlithography XXIII. San Jose: SPIE, 2010: 76400C.

[30] CHEN W T, PARK J S, MARCHIONI J, et al. Dispersion-engineered metasurfaces reaching broadband 90% relative diffraction efficiency[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 2544.

[31] CAI J X, ZHANG F, ZHANG M, et al. Simultaneous polarization filtering and wavefront shaping enabled by localized polarization-selective interference[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 14477.

[32] DUBEY A, YEN T J. Aluminum: a sustainable universal plasmonic materials[M]//BISWAS R, MAZUMDER N. Recent Advances in Plasmonic Probes: Theory and Practice. Cham: Springer, 2022: 171 − 189.

[33] TANG B, DAI L, JIANG C. Electromagnetic response of a compound plasmonic–dielectric system with coupled-grating-induced transparency[J]. Physics Letters A, 2012, 376(14): 1234 – 1238.

[34] TANG B, DAI L, JIANG C. Electromagnetically induced transparency in hybrid plasmonic-dielectric system[J]. Optics Express, 2011, 19(2): 628 – 637.

（编辑：张　磊）