

亚波长金属光栅的发展趋势

王中飞 张大伟 王琦 唐庆勇 洪瑞金 黄元申 庄松林

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093

摘要 亚波长金属光栅具有传统光栅所不具有的特殊性质,其透射率与消光比高、光谱宽度宽、偏振性能好,是一种性能优良的光学元件,在亚波长光学元件应用领域中占据重要地位。且其体积小、结构紧凑、易于集成,在光学系统中可减少光路元件、增加系统灵活性,具有改进和取代传统光学器件的潜力。简要介绍了亚波长金属光栅理论分析方面的进展,以及金属光栅结构创新、多维发展、理论模拟向实验制备、适用波段向太赫兹及紫外波段拓展等方面的发展趋势。同时也阐述了亚波长金属光栅在激光器系统、偏振成像、光电探测、薄膜太阳能电池、光学传感等领域广泛的应用前景。

关键词 衍射;亚波长金属光栅;形式双折射效应;消光比

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.010002

Development Trends of Subwavelength Metal Gratings

Wang Zhongfei Zhang Dawei Wang Qi Tang Qingyong Hong Ruijin

Huang Yuanshen Zhuang Songlin

*School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai Science and Technology,
Shanghai 200093, China*

Abstract Subwavelength metal grating has special properties which the traditional grating does not have. As a kind of optical element, it has a sort of excellent performances, including high transmission and extinction ratio, wide spectrum range, great polarization properties and so on. It plays an important role in the field of applications of subwavelength optical components. Furthermore, it can reduce the optical components and increase flexibility in the optical systems due to the advantages of small volume, compact structure and easy integration. It has the potential to improve and replace traditional optical devices. This paper presents the development of the analysis theories, as well as the trends of the innovation of structures, study of multi-dimensional, theoretical simulation to experiment, and applicable band extending to terahertz and ultraviolet band, for the subwavelength metal gratings. It also describes the wide application prospect of the subwavelength metal grating in the fields of laser system, polarization imaging, photoelectric detection, thin film solar cells, optical sensing, etc.

Key words diffraction; subwavelength metal grating; form birefringence effect; extinction ratio

OCIS codes 050.1950; 050.6624; 050.2555

1 引言

光栅多应用于分光仪器中,随着研究理论的深入与加工工艺的发展,人们在解释光栅性能的同时也发现了许多新的特性。如当光栅周期小于入射光波长时,一维亚波长金属光栅将表现出强烈的偏振相关特性,并在某些特定波长处出现用经典衍射理论难以解释的异常透射增强现象^[1]。这种偏振特性及异常透射

收稿日期: 2014-04-30; 收到修改稿日期: 2014-06-17; 网络出版日期: 2014-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(61378060, 61205156)、上海市教育委员会曙光计划(11SG44)、宝山科委课题(CXY-2012-05)、上海市研究生创新基金(JWCXSL1302)和上海市教育委员会科研创新项目(14YZ095)

作者简介: 王中飞(1988—),女,硕士研究生,主要从事亚波长金属光栅的设计及特性等方面的研究。

E-mail: middlefly2008@163.com

导师简介: 张大伟(1977—),男,教授,主要从事光学薄膜、离子束蚀刻技术、光栅元件及亚波长光栅器件等方面的研究。

E-mail: dwzhang@usst.edu.cn(通信联系人)

增强效应在光学领域中应用潜力巨大,目前,亚波长金属光栅已广泛应用于设计光学元件,如偏振器^[2-7]、偏振分束器^[8-10]、滤光片^[11-15]、传感器^[16-18]、探测器^[19-21]、圆偏振片^[22]等。实现了偏振、增透、分束、高反、窄带滤波等功能^[23]。

入射光电场的偏振方向会影响到光通过光栅后的衍射特性,使得金属光栅在透射或反射光谱中表现出不同于一般衍射光学元件的性质。对一维亚波长金属光栅,按照入射光偏振方向与光栅栅条的关系,可分为TM偏振光(偏振方向与光栅栅条垂直)和TE偏振光(偏振方向与光栅栅条平行)。TM偏振光和TE偏振光的透射率 T_{TM} 、 T_{TE} 及二者的比值(消光比),可有效反映光栅在偏振方面的性能。其中,透射率反映光栅对光能的利用率,消光比反映光栅偏振性能的强弱^[24]。目前,所设计的传统亚波长金属光栅结构中TM偏振光的透射率在某些波段可达到70%以上^[3-4],相应消光比也大于目前国际公认的消光比阈值($C=20$ dB)^[25]。

近年来,对于亚波长金属光栅的研究主要集中在光栅的制作工艺,器件性能改进及器件应用的拓展等方面。现有关于亚波长金属光栅的综述,大多针对的是亚波长金属光栅的特点、结构的分析与概括。而本文不仅更为详细地总结了近几年中亚波长金属光栅的分析理论、结构设计改进方面的研究进展,还分析了亚波长金属光栅在应用方面的发展情况。

2 亚波长金属光栅分析理论的研究

亚波长金属光栅由于其特殊的光学特性,越来越受到人们的关注。其相应的理论分析与设计也在逐步发展。光栅的标量衍射理论^[26]已相对比较成熟,但对周期小于入射光波长的亚波长金属光栅,传统的标量衍射理论已不再适合,需运用矢量衍射理论进行详细分析。与此同时,运用等效介质理论对其进行近似计算,可直观地反映光栅偏振特性的工作原理。

等效介质理论就是用一层均匀介质代替周期结构,即把周期结构光栅看成是一层与光栅高度相等的均匀介质,此时,整个光栅内部电场可看成是均匀的。根据Maxwell方程边界条件,等效介质层对TM偏振光和TE偏振光的等效折射率分别为^[5]

$$n_{TE} = [fn_2^2 + (1-f)n_1^2]^{1/2}, \quad (1)$$

$$n_{TM} = [fn_2^{-2} + (1-f)n_1^{-2}]^{-1/2}, \quad (2)$$

式中 n_1 为空气折射率, n_2 为光栅介质折射率, f 为占空比,且 $f=w/p$, w 为光栅条的宽度, p 为光栅周期。对金属光栅只需将 n_2 换成一般金属材料的折射率 $n_2=n+ik$,其中 n 和 k 分别表示金属的折射率和消光系数。可以看出,对不同的占空比 f ,TM偏振光与TE偏振光的等效折射率不同,这种效应称为形式双折射效应。因此,光栅表现出偏振特性,即偏振方向与光栅条平行的入射光(TE偏振光)被反射,偏振方向与光栅条垂直的入射光(TM偏振光)被透射。这种现象的本质在于TE偏振光可以激发纳米金属线的电子产生电流,使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空气间隙的存在而不能激发电流,从而发生透射。

利用等效介质理论便于理解金属光栅的偏振特性,并可以进行初步参数设计。但对于金属光栅参数的优化设计则必须采用更为严格的矢量衍射理论。目前被广泛采用的矢量衍射理论主要有:有限元法(FEM)^[27]、边界积分法(BIM)^[28]、严格耦合波分析法(RCWA)^[29]和时域有限差分法(FDTD)^[30]等。其中,严格耦合波分析法(RCWA)适用于周期结构元件(如光栅)的理论分析,不需要迭代,可直接得到光栅衍射Maxwell方程的收敛的稳定解。时域有限差分法(FDTD)的主要思想是用差分代替微分,突出的优点是可以直接在时域中求解Maxwell方程组,避免了FEM和BIM算法中引入过多的不符合物理意义的解,并且可以精确模拟非均匀、形状复杂的介质物体的电场散射、辐射问题。

1902年,Wood^[31]对金属光栅的衍射特性进行了研究。观察亚波长金属光栅的偏振光透射光谱,可以发现某些特定波长处会出现异常的透射增强现象。对于透射增强的原因,目前学者中主要存在两种观点:一种观点认为这种透射增强现象源于金属光栅结构中的表面等离子激元的激发和耦合^[32],而另一种观点则将其归因于类法布里珀罗(F-P)谐振效应产生的腔模共振^[19,33-34]。如谈春雷等^[33]认为,尽管入射光在通过一维金属光栅时,确实会在光栅表面激发表面等离子激元极化波,这种表面波也会对光栅透射光谱产生一定的影

响,但不是透射率增强的主要原因。相反地,只有将金属光栅狭缝看成一个类F-P腔结构,在某些特定波长使驻波波长与光栅厚度满足匹配条件时才会出现异常透射增强效应。在文献[35]中,Crouse指出通过改变一维亚波长金属光栅沟槽的宽度,以及栅条之间填充的介质,可分别实现TM偏振光透射增强、TE偏振光透射增强及非偏振光透射增强,从而可设计出新型的金属-半导体-金属结构的光电探测器、金属光栅偏振器和滤波器等器件。

3 亚波长金属光栅的研究进展

亚波长金属光栅的性能受诸多参数的影响,如金属材料、光栅周期、光栅宽度、光栅槽深、光栅槽型等。在光栅性能优化的过程中,可以改变光栅自身的结构参数,也可以改变光栅的整体结构,如从单层结构到多层结构,从一维结构到二维结构,从单周期结构到双周期交叉结构等,这些都可以达到提高偏振光透射率与消光比或增大偏振光反射率的目的。

3.1 单层结构向多层结构的发展

传统亚波长金属光栅基本结构如图1所示。其由透明基底及金属光栅层构成,其中光栅周期为 P ,金属栅条宽度为 ω ,高度为 h ,占空比为 f ,且 $f = \omega/P$ 。在直角坐标系 $oxyz$ 中,光栅栅条沿 y 轴方向延伸, x 轴方向为光栅的周期变化方向, z 轴垂直于光栅层与基底材料的分界面。TE偏振方向与光栅槽型方向一致,即沿 y 方向,而TM偏振方向垂直于光栅槽型方向,即沿 x 方向。根据张娜等^[6]的研究,金属材料的选择影响光栅的光学性能,亚波长金属光栅中常用金属材料为铝、铬、银、金、铜五种金属。

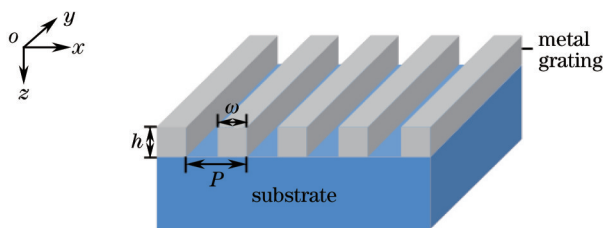


图1 亚波长金属光栅结构图

Fig.1 Schematic diagram of subwavelength metal grating structure

为改善亚波长金属光栅的光学特性,对其结构进行了创新。在基底与金属光栅层之间增加一层介质膜,如氟化镁薄膜^[6],如图2(a)所示,薄膜厚度为 h_1 ,折射率为 n_H ,可同时实现宽带、高透射率和高消光比。若将氟化镁薄膜进行部分刻蚀,即可设计出适用波段为380~520 nm的宽带宽、高TM光透射率与消光比的双层结构的亚波长金属光栅偏振器。进一步的仿真结果表明,该偏振器在整个可见光波段也表现出很好的偏振性能,TM的透射率大于61.5%,消光比大于370^[5]。后来叶燕等^[11]发现若将介质薄膜层改为介质光栅层,将会得到更高的透射率与消光比。周云等^[3]还提出了一种具有双层金属层的亚波长金属光栅偏振器,如图2(b)所示,即将金属光栅沉积在介质光栅层上,与介质光栅具有相同的栅条宽度。此种结构在提高透射率与消光比的同时,获得了更加均匀的透射光谱强度。进一步地将介质光栅切出特定切口,其在可见光光谱中, TM光的透射率大于70%,而在470~800 nm波段中,可超过80%^[4]。图2(c)所示为一种金属-介质光栅结构,可实现光学透射增强^[36]。若更换为半导体-绝缘体-金属光栅结构,将表现出偏振不敏感性,同时对TM偏振光与TE偏振光都有很高的反射率^[37]。通过控制金属-介质的层数或光栅周期还可以研究其聚焦特性,从而实现焦距和焦深的改变^[38]。这种结构在微纳制造、光刻、小型天线等方面具有一定的应用前景。Wu等^[39]提出的一种具有双周期结构的金属光栅,如图2(d)所示,不仅对TM偏振光及TE偏振光均可获得高的透射率和消光比,还可以用来作为偏振分束器。

3.2 一维结构向多维结构的发展

亚波长光栅的光栅结构按光栅周期的空间变化可以分为一维、二维、准周期和连续四种结构^[2]。一维结构的亚波长光栅,如图3(a)所示,其周期的空间变化(光栅矢量)只有一个方向,光栅周期 P 小于入射光波长 λ 。而二维结构的亚波长光栅则如图3(b)所示,其在一个空间变化周期 D 内包含两个刻槽方向相互垂直的一维亚波长周期结构,且周期 D 大于入射光波长 λ 。准周期结构的亚波长光栅,如图3(c)所示,在一个周期 D 内包含多个刻槽方向离散变化的一维亚波长周期结构。连续结构的亚波长光栅,如图3(d)所示,光栅矢量

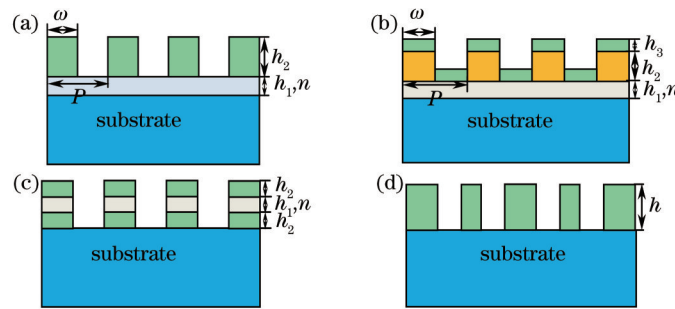
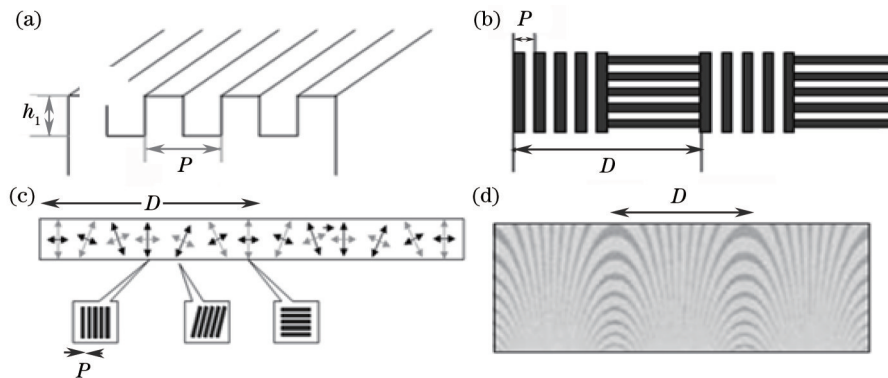


图2 四种不同结构的亚波长金属光栅示意图

Fig.2 Schematic diagram of four different subwavelength metal grating structures

在一个周期 D 内连续变化。

目前,亚波长一维和二维光栅结构发展已相对比较成熟,且已得到广泛的应用。而准周期和连续结构的光栅还在探索阶段。多维结构光栅制作复杂,但其各方面的性能都要比一维结构光栅优越,将具有更加广泛的应用和良好的发展前景。

图3 亚波长光栅结构示意图,其中 $D > \lambda$, $P < \lambda$ 。(a) 一维结构;(b) 二维结构;(c) 准周期结构;(d) 连续结构Fig.3 Schematic diagram of subwavelength grating, and $D > \lambda$, $P < \lambda$. (a) One-dimensional structure;

(b) two-dimensional structure; (c) quasi-periodic structure; (d) continuous structure

一维亚波长金属光栅表现出明显的双折射效应,即对入射光的偏振方向敏感,只对 TM 偏振光具有较高的透射率。在一维亚波长金属光栅的基础上,研究人员提出了二维亚波长金属光栅的模型^[12-13,40-43],如图 4 所示。假设入射光偏振沿 x 方向为 TM 偏振光,沿 y 方向为 TE 偏振光, x 、 y 方向上的周期分别为 P_x 、 P_y ,金属光栅槽深为 h 。对比二维亚波长金属光栅,影响其光学性能的主要参数有:光栅面上浮雕结构的形状、两轴向上的光栅周期及占空比、光栅槽深、入射波长、入射光偏振角等。针对中心波长为 $10.6 \mu\text{m}$ 红外光,陈四海等^[41]分析了一种具有特定的矩形柱状结构的二维金属光栅的衍射特性。2012年,陈娟等^[42]分析了二维矩形金属光栅和二维椭圆柱金属光栅的透射率。利用二维金属光栅还可实现输入线偏振到输出任意偏振态的控制,并在优化的结构参数基础上,通过空间角度调制的方法,将输出的偏振态对应表示在邦加球上,实现全覆盖^[43]。基于二维级联光栅还可实现彩色滤光片功能,半峰全宽约为 100 nm ,中心波长透射率大于 70% ,相比传统滤光片提高 13% ^[5]。Park 等^[13]设计出的一种具有二维结构的亚波长金属光栅,在特定波长处实现了偏振无关的带通滤波的功能。

对二维亚波长金属光栅,由于光栅结构的对称性,可以等效为两个物理机制相同,且栅条方向分别沿 x 轴方向和 y 轴方向的一维金属光栅叠加,那么 TE 偏振光对于沿 x 方向的栅条可以等效地看作 TM 偏振光,因此可使介于 TM 与 TE 偏振光之间的任意线偏振状态的入射光实现大部分高透射。如入射光偏振角为 75° 时,二维金属光栅可实现 $\lambda/4$ 波片功能,此时二维矩形金属光栅和二维椭圆柱金属光栅的透射率分别为 0.7 和 0.67 ^[42]。

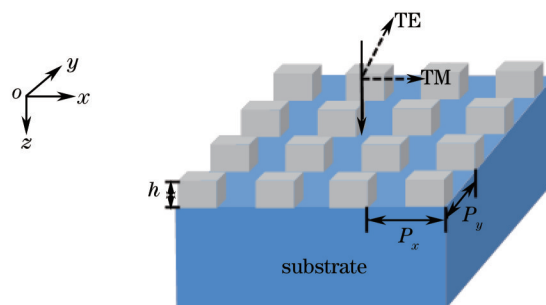


图4 二维亚波长金属光栅示意图

Fig.4 Schematic view of two-dimensional metal grating

3.3 理论研究向实验制备的发展

目前常用来对亚波长金属光栅进行理论模拟的商业软件有 G Solver、Lumerical FDTD solutions、VirtualLab 等。其中, FDTD solutions 以麦克斯韦方程组为运算基础, 对电磁场 E 、 H 分量离散, 在空间和时间上交替抽样, 将含时间变量的麦克斯韦旋度方程转换为差分方程, 并在时间轴上逐步求解每一时刻的空间电磁场。软件能够高效准确地模拟色散材料, 且其独有的技术“多系数材料模型”, 可使用户自行设定系数个数、拟合误差和波长范围。软件还可以根据仿真结构自动选择网格划分技术, 根据需要提高网格分辨率, 获得更高计算精度。

亚波长金属光栅的应用前景广阔, 不少研究人员在理论分析的同时也研究了亚波长金属光栅的微加工工艺。如 Song^[44] 采用全息的方法制作了周期为 240 nm 的铝光栅偏振光分束器, 主要用于波长为 780 nm 的磁光存储系统。Clausnitzer^[45] 采用电子束直写在石英玻璃基底上, 制备了周期为 300 nm 的金属铬光栅阵列。韩国 LG 电子研究所的研究人员采用热纳米压印和干法刻蚀相结合的工艺, 制备出了周期为 100 nm, 占空比为 0.5 的金属铝光栅^[46]。中国科学院微电子研究所纳米加工与新器件集成实验室的 Wang 等^[47], 也采用电子束光刻和 X 射线光刻相结合的曝光技术, 成功研制了线宽为 250 nm 的光栅图形。

工艺制备方面, 亚波长金属光栅的光刻胶图形制作方法主要有全息光刻工艺、电子束直写曝光技术、纳米压印技术和 X 射线光刻技术。其中, 纳米压印技术由于具有超高分辨率、高产量、低成本等特点而有望成为一种工业化生产技术。纳米压印技术虽形式多样, 但原理基本相同。其样品制备过程一般为: 首先制备纳米压印的模板, 然后通过热压将模板压印到金属层上的光刻胶中, 最后再通过降温脱模及反应氧离子刻蚀掉残留层即可得到光刻胶上的图形。再次利用离子束刻蚀就可将光栅槽型转移到金属层中。

3.4 亚波长金属光栅适用波段的拓展

亚波长金属光栅的应用波段不断向太赫兹波段和紫外波段扩展。目前, 市场上已有的金属光栅主要针对的是可见光波段及红外波段, 但随着太赫兹波光学性能研究的愈加深, 对太赫兹波段光学器件的需求变得越来越迫切。李术新等^[48] 研究了太赫兹波段亚波长金属周期微结构器件所表现出的光谱选择增强透射现象。刘立明等^[49] 利用光刻工艺, 在硅衬底上制成了一系列一维金属光栅, 系统研究了在 0.2~2.6 THz 范围内光栅各参数对偏振特性的影响, 为进一步研制高性能的太赫兹偏振器提供了参考。对紫外区域, Weber^[50] 设计出了一种适用于紫外区域的光栅偏振器, 在波长为 300 nm 处的透射率接近 60%, 消光比达到 15 dB, 表现出了较好的偏振效果。凌进中等^[24] 设计的基于亚波长金属光栅的可调谐线栅偏振器, 在紫外及可见光波段内, 对于任意入射波长, 都可以通过压电陶瓷调谐双层线栅间的间距来寻找透射光的最佳偏振状态。

4 亚波长金属光栅的应用研究

亚波长金属光栅可以较为方便地实现传统光学元件很难实现的某些光学功能, 具有广泛的应用前景和较高的市场价值。利用亚波长金属光栅的偏振特性制作的新型偏振器, 有望代替传统的偏振器件。传统偏振器大都利用天然晶体的双折射特性或多层膜结构的偏振选择特性制作而成, 例如波片, 可通过解理石英、云母晶体而成。对晶体偏振器, 由于双折射晶体的分开角度小, 使得其需要很大的厚度才足以分开两个偏振态, 很难实现微型化和集成化; 多层膜结构的偏振器在制作时需要堆积很多的薄膜层, 制作过程相对复杂, 且只在一个较小的波长范围和角度范围内才具有大的消光比, 因此这两种类型偏振器的应用都受到了一定

的限制^[2]。而亚波长金属光栅可进行批量生产,且价格低,易集成,通过调整光栅的填充系数还可工作在比较宽的波长范围内。此类偏振器多应用于光通信^[51-52]、液晶显示^[4,53]、偏振成像^[25]、偏振导航^[54]等方面。

另外,在光学系统中,由于存在菲涅耳反射,使得光学系统的透射性能降低。利用亚波长光栅的抗反射作用制作的抗反射元件^[40-41],可以有效地提高光能透射率,增强元件的功能。通过调整亚波长金属光栅的结构参数,还可以实现对透射和反射的两束光的强度比例,实现分束的功能^[39]。在光纤传感中,光纤端面的金属光栅可以很好地实现类似于沃拉斯顿棱镜的分束检偏功能,用其代替原来的沃拉斯顿棱镜,可以将光纤传感器变成体积小、性能稳定、没有任何分立光学元件的全光纤器件。通过调节亚波长金属光栅的深宽比,可实现相位延迟功能^[65]。在偏振片、波片的基础上,还可以进一步设计光环形器、光隔离器等微型器件。利用光栅表面等离子激元可提高光电器件的效率,如激光器^[56-57]、太阳能电池^[58-60]、探测器^[20-21]、传感器^[16-18]等。在激光器内部加入亚波长金属光栅制作的新型激光器,可以有效地控制出射光束的强度分布和激光模式,具有单模激射、光谱稳定性高、线宽窄、体积小和制作成本低等优点。利用亚波长金属光栅制作出来的这些元件有利于实现器件的微型集成化和规模化。

5 结 论

叙述了亚波长金属光栅理论分析方面的研究进展,并从其结构创新、适用波长范围、理论向实验制备等方面总结了亚波长金属光栅的研究近况。理论和实验研究都表明这一光学元件有很大的发展空间。亚波长金属光栅具有显著的偏振特性即形式双折射效应,入射光电场的偏振方向将会决定光的衍射情况,使得金属光栅的透射或反射光谱表现出不同于一般衍射光学元件的性质,因其所具备的独特特性,在改进和取代传统光学元件方面有很大的潜力。亚波长金属光栅被广泛地应用于偏振成像、光电检测、光学传感、太阳能电池等领域。

参 考 文 献

- 1 Schroter U, Heitmann D. Surface-plasmon-enhanced transmission through metallic gratings[J]. *Phys Rev B*, 1998, 58(23): 15419-15421.
- 2 Zhu Jiukai, Wu Fuquan, Ren Shufeng, *et al.*. Research and development prospects of the subwavelength grating polarizer[J]. *Laser Journal*, 2012, 33(6): 1-3.
朱久凯, 吴福全, 任树锋, 等. 亚波长光栅偏振器的研究现状与发展前景[J]. *激光杂志*, 2012, 33(6): 1-3.
- 3 Zhou Yun, Shen Shu, Ye Yan, *et al.*. Research on the characteristics of subwavelength metal grating polarizers with a high refractive-index dielectric layer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 1158-1161.
周云, 申溯, 叶燕, 等. 带有高折射率介质层的金属光栅偏振器特性的研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(4): 1158-1161.
- 4 Ye Zhicheng, Peng Yao, Zhai Tianrui, *et al.*. Surface plasmon-mediated transmission in double-layer metallic grating polarizers[J]. *J Opt Soc Am B*, 2011, 28(3): 502-507.
- 5 Meng Fantao, Chu Jinkui, Han Zhitao, *et al.*. Effect of profile error on performance of subwavelength wire-grid polarizer[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.
- 6 Zhang Na, Chu Jinkui, Zhao Kaichun, *et al.*. The design of the subwavelength wire-grid polarizers based on rigorous couple-wave theory[J]. *Chinese Journal of 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.
- 7 Stephen Y Chou, Peter R Krauss, Preston J. Renstrom. Nano-imprint lithography[J]. *J Vac Sci Technol B*, 1996, 14(6): 4129-4133.
- 8 L Pajewski, R Borghi, G Schettini, *et al.*. Design of a binary grating with subwavelength features that acts as a polarizing beam splitter[J]. *Appl Opt*, 2001, 40(32): 5898-5905.
- 9 Bo Wang, Li Chen, Liang Lei, *et al.*. Diffractive polarizing beam splitter of two-layer grating for operation in reflection[J]. *Opt Commun*, 2013, 311: 307-310.
- 10 Bo Wang, Liang Lei, Li Chen, *et al.*. Connecting-layer-based polarizing beam splitter grating with high efficiency for both TE and TM polarizations[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(7): 2145-2148.

- 11 Ye Yan, Zhou Yun, Zhang Heng, *et al.*. Polarizing color filter based on a submicron metal grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0405003.
叶 燕, 周 云, 张 恒, 等. 金属光栅型偏振彩色滤光片[J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 0405003.
- 12 Ye Yan, Zhang Heng, Zhou Yun, *et al.*. Color filter based on a submicrometer cascaded grating[J]. *Opt Commun*, 2010, 283(4): 613-616.
- 13 Chang-Hyun Park, Yeo-Taek Yoon, Sang-Shin Lee. Polarization-independent visible wavelength filter incorporating a symmetric metal-dielectric resonant structure[J]. *Opt Express*, 2012, 20(21): 23769-23777.
- 14 Nghia Nguyen-Huu, Yu-Lung Lo, Yu-Bin Chen, *et al.*. Realization of integrated polarizer and color filters based on subwavelength metallic gratings using a hybrid numerical scheme[J]. *Appl Opt*, 2011, 50(4): 415-426.
- 15 Ding Qiulan, Zhou Yun, Ye Yan, *et al.*. Reflection characteristics of metal-dielectric-metal reflective-type color filter [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(4): 693-697.
丁秋兰, 周 云, 叶 燕, 等. 基于金属-介质-金属结构的反射式彩色滤光片特性研究[J]. *应用光学*, 2012, 33(4): 693-697.
- 16 Xiao Yufei, Zhang Weiping, Huang Haihua, *et al.*. Influence of function of metal grating shape on surface plasmon resonance[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(11): 1114001.
肖钰斐, 张卫平, 黄海华, 等. 金属光栅结构对表面等离子体共振的影响[J]. *中国激光*, 2013, 40(11): 1114001.
- 17 Luo Tingjun, Wan Lingyu, Huang Jiqin, *et al.*. Shape optimization and analysis of sensing properties of localized surface plasmon resonances for triangle metal nanoparticles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0524002.
罗庭军, 万玲玉, 黄继钦, 等. 三角形金属纳米结构的局域表面等离共振传感特性与优化分析[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0524002.
- 18 Liu Fan, Yuan Jinshe, Li Haijun. Transmissive metal grating coupled SPR sensor[J]. *Novel Semiconductor Device*, 2012, 37(6): 452-455.
刘 帆, 苑进社, 李海军. 透射式金属光栅耦合 SPR 传感器[J]. *新型半导体器件*, 2012, 37(6): 452-455.
- 19 Crouse D, Keshavareddy P. Role of optical and surface plasmon modes in enhanced transmission and applications[J]. *Opt Express*, 2005, 13(20): 7760-7767.
- 20 Weng Qianchun, Li Liang, Chen Jun, *et al.*. The metal grating coupling of long-wavelength quantum well infrared photodetectors: surface plasmon effect[J]. *J Infrared Millim Waves*, 2011, 30(5): 415-418.
翁钱春, 李 梁, 陈 俊, 等. 长波量子阱红外光电探测器金属光栅耦合的研究-基于金属表面等离子效应[J]. *红外与毫米波学报*, 2011, 30(5): 415-418.
- 21 Zhou Wenchao, Wu Yihui, Hao Peng, *et al.*. Transmission bandpass filters based on two-dimensional subwavelength metallic gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 1105001.
周文超, 吴一辉, 郝 鹏, 等. 二维亚波长金属光栅多波长透射滤光片[J]. *光学学报*, 2013, 33(11): 1105001.
- 22 Yang Shengchao, Li Hao, Li Jiayin. Optimization design of circular polarizer based on reflex metal grating[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(11): 3117-3122.
杨胜超, 李 浩, 李家胤. 反射式金属光栅圆极化器的优化设计[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(11): 3117-3122.
- 23 Zhao Huajun, Yuan Dairong, Wu Zhengmao. Research development of subwavelength polarization gratings[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(3): 38-43.
赵华君, 袁代蓉, 吴正茂. 亚波长偏振光栅的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(3): 38-43.
- 24 Ling Jinzhong, Huang Yuangshen, Wang Zhongfei, *et al.*. A high performance tunable nanowire-grid polarizer[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(14): 144214.
凌进中, 黄元申, 王中飞, 等. 可调谐金属线栅偏振器的特性研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(14): 144214.
- 25 Kang Guoguo, Tan Qiaofeng, Chen Weili, *et al.*. Design and fabrication of sub-wavelength metal wire-grid and its application to experimental study of polarimetric imaging[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(1): 014218.
康果果, 谭峴峰, 陈伟力, 等. 亚波长金属线栅的设计、制备及偏振成像实验研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(1): 014218.
- 26 Liu Quan, Wu Jianhong. Analysis and comparison of the scalar diffraction theory and coupled-wave theory about grating[J]. *Laser Journal*, 2004, 25(2): 31-34.
刘 全, 吴建宏. 光栅的标量衍射理论与耦合波理论的分析比较[J]. *激光杂志*, 2004, 25(2): 31-34.
- 27 D Maystre. A new general integral theory for dielectric coated gratings[J]. *J Opt Soc Am A*, 1978, 68(4): 490-495.
- 28 D E Tremain, K K Mei. Application of the unimoment method of scattering from periodic dielectric structure[J]. *J Opt Soc Am A*, 1978, 68(6): 775-783.

- 29 T K Gaylord. 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.
- 30 Kane S Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 1966, 14(3): 302-307.
- 31 R W Wood. On a remarkable case of uneven light in a diffraction grating spectrum[J]. *Proc Phys Soc London*, 1902, 18(1): 269-275.
- 32 T W Ebbesen, H J Lezec, H F Ghaemi, *et al.*. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays [J]. *Nature*, 1998, 391(6668): 667-669.
- 33 Tan Chunlei, Yi Yongxiang, Wang Guoping. Optical transmission properties of one-dimensional metallic gratings[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, 51(5): 1063-1067.
谈春雷, 易永祥, 汪国平. 一维金属光栅的透射光学特性[J]. *物理学报*, 2002, 51(5): 1063-1067.
- 34 Liang Yuzhang, Peng Wei. Theoretical study of transmission characteristics of subwavelength nano-structured metallic grating[J]. *Applied Spectroscopy*, 2013, 67(1): 49-53.
- 35 Crouse D. Polarization independent enhanced optical transmission in one-dimensional gratings and device applications[J]. *Opt Express*, 2007, 15(4): 1415-1427.
- 36 Lin Zhou, Qian-jin Wang, Shan Wu, *et al.*. Hybrid of surface plasmon polaritons and wave-guide resonances through double-layer metallic gratings[J]. *J Opt Soc Am B*, 2011, 28(3): 587-590.
- 37 Liu Anjin, Fu Feiya, Wang Yufei, *et al.*. Polarization-insensitive subwavelength grating reflector based on a semiconductor-insulator metals structure[J]. *Opt Express*, 2012, 20(14): 14991-15000.
- 38 Li Hui, Yan Lianshan, Pan Wei, *et al.*. Focusing properties with a Single subwavelength slit flanked by metal-dielectric multilayer grating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(1): 013102.
李慧, 闫连山, 潘炜, 等. 多层金属-介质镀膜光栅的聚焦特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(1): 013102.
- 39 Wu Jun, Zhou Changhe, Cao Hongchao, *et al.*. Broadband polarizing beam splitter with metal-wire nanograting in near infrared region[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 47: 166-170.
- 40 Cao Zhaoliang, Lu Zhenwu, Li Fengyou. Design consideration of two-dimensional anti-reflective subwavelength periodic gratings[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(6): 537-541.
曹召良, 卢振武, 李凤友, 等. 二维抗反射亚波长周期结构光栅的设计分析[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(6): 537-541.
- 41 Chen Sihai, Cheng Zhijun, Huang Guang, *et al.*. Design and fabrication of subwavelength antireflection gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(11): 1359-1631.
陈四海, 程志军, 黄光, 等. 亚波长消反射光栅[J]. *光学学报*, 2003, 23(11): 1359-1631.
- 42 Chen Juan, Yan Lianshan, Pan Wei, *et al.*. Comparison of transmission properties of two kinds of subwavelength metallic wave plates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0405001.
陈娟, 闫连山, 潘炜, 等. 两种亚波长金属波片的透射特性对比[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0405001.
- 43 Chen Juan, Yan Lianshan, Pan Wei, *et al.*. Arbitrary polarization transformation based on two-dimensional metallic rectangular gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1224001.
陈娟, 闫连山, 潘炜, 等. 二维金属矩形光栅的偏振控制及其透射特性[J]. *光学学报*, 2011, 31(12): 1224001.
- 44 Song P. Polarization-Control Components and Narrow-Band Filters Based on Subwavelength Grating Structures[D]. New York: University of Rochester, 1996.
- 45 T Clausnitzer, H-J Fuchs, E-B Kley, *et al.*. Polarizing metal stripe gratings for a micro-optical polarimeter[C]. *SPIE*, 2003, 5183: 8-15.
- 46 Seh-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(9): 1874-1877.
- 47 Deqiang Wang, Leifeng Cao, Chang-Qing Xie, *et al.*. Microzone plates with high-aspect ratio fabricated by e-beam and X-ray lithography[J]. *J Microlith, Microfab, Microsyst*, 2006, 5(1): 0130021.
- 48 李术新, 梁东, 邢歧荣, 等. 零级深度金属光栅对太赫兹波透过特性的理论研究[C]. *光电技术与系统文选——中国光学学会光电技术专业委员会成立二十周年暨第十一届全国光电技术与系统学术会议论文集*, 2005. 907-909.
- 49 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, 张杲辉, 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.

- 50 T Weber, T Kasebier, E B Kley, *et al.*. Broadband iridium wire-grid polarizer for UV applications[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(4): 445-447.
- 51 Lee K D, Ahn S W, Kim S H, *et al.*. Nanoimprint technology for nano-structured optical devices[J]. *Current Applied Physics*, 2006, 6(1): e149-e153.
- 52 Wang J J, Deng J, Deng X, *et al.*. Augustsson, Innovative high-performance nanowire-grid polarizers and integrated isolators[J]. *J Sel Top Quantum Electron*, 2005, 11(1): 215-217.
- 53 Sang Hoon Kim, Joo-Do Park, Ki-Dong Lee. Fabrication of a nano-wire grid polarizer for brightness enhancement in liquid crystal display[J]. *Nanotechnology*, 2006, 17(17): 4436-4438.
- 54 Chu Jinkui, Wang Zhiwen, Zhang Yingjie, *et al.*. Multi-orientated wire-grid polarizer and its application to polarization navigation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(10): 2237-2244.
褚金奎, 王志文, 张英杰, 等. 多方向金属光栅偏振器及在偏振导航中的应用[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(10): 2237-2244.
- 55 N Bokor, R Shechter, N Davidson, *et al.*. Achromatic phase retarder by slanted illumination of a dielectric grating with period comparable with the wavelength[J]. *Appl Opt*, 2001, 40(13): 2076-2080.
- 56 Shi Junxiu, Qin Li, Ye Shujuan, *et al.*. A 927 nm distributed feedback laser with surface second-order metal grating[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2011, 22(10): 1488-1491.
仕均秀, 秦莉, 叶淑娟, 等. 具有表面二阶金属光栅的927 nm分布反馈半导体激光器的研制[J]. *光电子·激光*, 2011, 22(10): 1488-1491.
- 57 Zhang Xiangwei, Ning Yongqiang, Qin Li, *et al.*. Polarization control of 980 nm high-power vertical-cavity surface-emitting lasers by using sub-wavelength metal-gratings[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2012, 33(9): 1012-1017.
张祥伟, 宁永强, 秦莉, 等. 基于亚波长金属光栅的980 nm高功率垂直腔面发射激光器偏振控制[J]. *发光学报*, 2012, 33(9): 1012-1017.
- 58 Zheng Gaige, Zhan Yu, Cao Kun, *et al.*. Fabrication of subwavelength metal grating and analysis with vector diffraction theory[J]. *Chinese J Luminescence*, 2013, 34(7): 935-939.
郑改革, 詹煜, 曹焜, 等. 亚波长金属光栅结构的制备与矢量衍射理论分析[J]. *发光学报*, 2013, 34(7): 935-939.
- 59 Wang Zhibin, Zhang Qian, Zhang Jian, *et al.*. Improvement of LED light emitting efficiency by using double metal gratings[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(12): 1624-1630.
王志斌, 张骞, 张健, 等. 基于表面等离子激元的双金属光栅结构提高LED光提取效率的研究[J]. *发光学报*, 2013, 34(12): 1624-1630.
- 60 Li Hongjing. Application of metal gratings to enhance optical absorption in thin-film solar cells[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(3): 505-509.
李洪敬. 金属光栅用于增强非晶硅薄膜太阳能电池光吸收率研究[J]. *应用光学*, 2014, 35(3): 505-509.

栏目编辑: 殷建芳