

亚波长减反射光栅的研究进展

叶鑫 蒋晓东 张继成 王凤蕊 罗炫 方瑜 肖磊 易早

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 介绍了亚波长光栅衍射理论体系以及基于纳米平版印刷术的亚波长减反射光栅的设计与制备、减反射特性和应用等方面的最新研究进展。分析了以亚波长减反射光栅作为光学系统增透元件的可行性。展望了亚波长减反射光栅向可见光、紫外波段的发展趋势,以及在高功率激光领域的应用前景。研究表明,亚波长光栅在减反射和激光损伤方面均具有优异的特性,而且有可能同时实现多种功能,简化光学系统。利用纳米平版印刷术可以使亚波长光栅的制备和应用向可见光、紫外波段方向延伸。

关键词 衍射光栅;亚波长减反射光栅;等效介质理论;矢量衍射理论;纳米平版印刷术

中图分类号 O436

OCIS 050.1950 050.6624

文献标识码 A

Research Development of Subwavelength Antireflection Gratings

Ye Xin Jiang Xiaodong Zhang Jicheng Wang Fengrui Luo Xuan Fang Yu
Xiao Lei Yi Zao

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract The theory of sub-wavelength diffraction grating is introduced and the latest research of design and fabrication, anti-reflection property, and application of sub-wavelength anti-reflection grating based on nanolithography are reviewed. The feasibility of the sub-wavelength anti-reflection grating used as an optical system reflection reducing element is analysed. The trend of development of sub-wavelength anti-reflection grating to visible light, ultraviolet band, as well as the application of sub-wavelength anti-reflection grating in the field of high-power laser is prospected. It is shown that subwavelength gratings exhibit excellent optical property on antireflective and laser-induced-damage thresholds. And the template gratings will simplify optical system because of its excellent optical property. It can make the fabrication and application of subwavelength grating extend to visible light and ultraviolet using nanolithography.

Key words diffraction grating; subwavelength antireflection grating; effective medium theory; vector diffraction theory; nanolithography

1 引言

亚波长光栅是光栅周期小于工作光波长的一种周期结构光学元件,具有减反射(AR)特性和偏振双折射效应,可以应用于减反射表面、相位调制、滤波器和偏振分束器等^[1~3]。亚波长减反射光栅可以应用于太阳能电池;也可以应用于光学元器件中代替光学增透膜,它具有一些光学薄膜所不具有的优点。首先它直接在基底刻蚀出栅格,具有和基底相同的材质,这样可以降低异质缺陷所导致的光学元件激光损伤的风险;其次亚波长光栅的特征尺寸处于亚微米量级,其表面效应较小,光栅减反射性能稳定性高;在某些波段,亚波长光栅可以在减反射的基础上实现谐波分离的功能;同时还能实现大角度范围内的光学减反射^[4]。本文对亚波长光栅在减反射和激光损伤方面的特性进行了研究,并对其应用和制备进行了分析。

收稿日期: 2009-06-01; 收到修改稿日期: 2009-08-11

基金项目: 国家自然科学基金(60908023)资助课题。

作者简介: 叶鑫(1983—),男,硕士研究生,主要从事光学材料方面的研究。E-mail: yehanwin@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 蒋晓东(1970—),男,副研究员,主要从事高功率光学材料方面的研究。E-mail: jiangxdong@163.com

(通信联系人)

2 理论基础

亚波长光栅的特征尺寸小于工作波长,此时标量衍射理论不再适合,矢量衍射理论是分析亚波长光栅的精确理论。亚波长光栅的衍射理论体系如图 1 所示。常用的矢量衍射理论分析方法如有限元法、边界元法、有限差分法、时域差分法或频域差分法、严格的耦合波理论和模态理论等。其中耦合波理论和模态理论计算量较小,应用更加广泛。

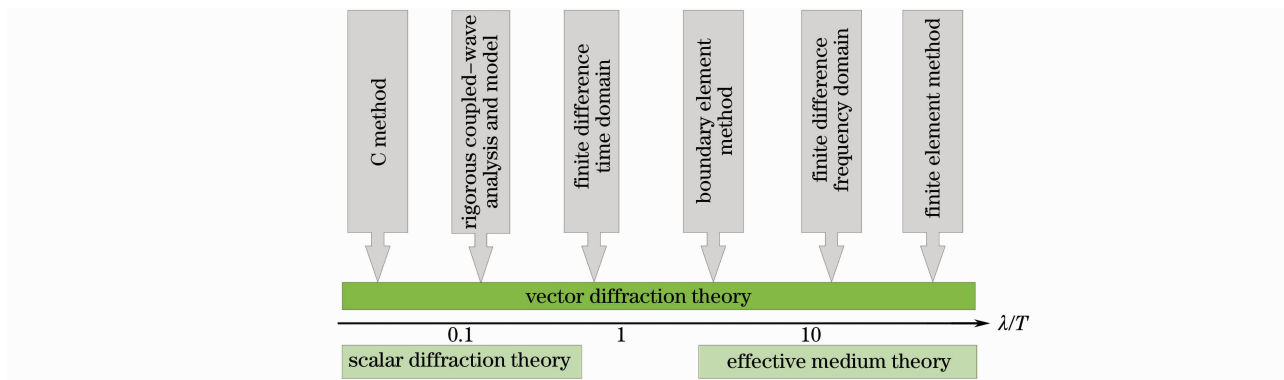


图 1 亚波长光栅的衍射理论体系

Fig. 1 Theory system of diffraction of sub-wavelength grating

耦合波理论是将光波电磁场的解按照平面波分量展开成一系列的空间谐波的形式,每个平面波分量的振幅是光栅沟槽深度的函数,通过求解光栅调制区平面波的耦合波微分方程组来确定这些空间谐波的表达式,进而求出光栅调制的光波的电磁场。它最早由 M. G. Moharam 等^[5]提出来解决一维亚波长光栅的衍射问题。E. Noponen 等^[6]利用它研究了二维亚波长光栅的衍射特性。模态理论是将光栅区的振幅按照特征模进行展开,而光栅区每一深度的特征模由独立的波动方程来求解^[7]。T. K. Gaylord 等^[8]证明耦合波理论和模态理论实质上是一致的。

矢量衍射理论的计算是一个非常复杂的过程,目前有许多基于矢量衍射的设计软件。许多科研工作者尝试一种适合分析亚波长光栅的近似理论——等效介质理论,它的基本思想是将亚波长光栅等效为一层均匀的介质薄膜,等效膜层的折射率是关于占空比的函数,应用薄膜光学的理论来计算亚波长光栅的衍射特性^[9]。等效介质理论一般认为在光栅特征尺寸远小于波长时适用。

亚波长光栅减反射产生的根源是亚波长光栅调制区可以产生折射率渐变,从这个角度来说,三角面型的亚波长光栅能取得非常好的减反射效果。通过将亚波长光栅调制区分层近似,三角面型的亚波长光栅是达到的最好折射率渐变结构。

基于矢量衍射理论的亚波长减反射光栅设计工作量非常大,常用作光栅样品的分析和优化手段,等效介质理论是一种直观粗略的光栅设计理论。但是关于二维亚波长光栅的等效模式目前没有定论,已提出利用一维亚波长光栅的等效模式经过修正用于二维亚波长光栅的等效模式,以下给出其中一种等效模式,有助于直观地理解亚波长光栅的减反射原理。

等效介质理论中等效介质膜层反射率^[4]为

$$R = (n_3 - N^2/n_1)^2 / (n_1 + N^2/n_3)^2,$$

式中 N 为等效折射率, n_1 和 n_3 分别为空气折射率和基片折射率。等效折射率 N 和厚度为 h 的薄膜垂直入射时零反射的条件为

$$N = (n_1 n_3)^{1/2}, \quad h = \lambda / (4N),$$

式中 $N^4 = \frac{f_x N_{TM}^2 + (1 - f_x) n_3^2}{f_y N_{TE}^2 + (1 - f_y) n_3^2}$, N_{TM} , N_{TE} 分别为 TM 波和 TE 波的等效折射率, $N_{TM}^2 = f_y n_1^{-2} + (1 - f_y) n_3^{-2}$, $N_{TE}^2 = f_x n_1^2 + (1 - f_x) n_3^2$; $f_x = l_x / T_x$ 和 $f_y = l_y / T_y$ 分别为 x , y 方向上的占空比, l_x , l_y 分别为 x , y 方向上的栅格长度, T_x , T_y 分别为 x , y 方向上的周期。

曹召良等^[4,10,11]基于耦合波理论讨论了单台阶二维亚波长光栅的周期、栅格高度、入射角度对反射率的

影响, 占空比对透射率的影响; 研究了亚波长光栅制备过程中的误差分析。图 2(a) 为亚波长光栅周期与反射率之间的关系, 可见反射率随着表面浮雕结构的周期增大而呈单调递增的趋势。当周期远小于波长时 ($T < 0.2\lambda$ 时), 周期误差对反射率的影响几乎为零。图 2(b) 为栅格高度与反射率之间的关系, 可知反射率随浮雕高度的变化而成周期变化; 三角面型的亚波长光栅由于存在折射率的渐变, 可以达到宽光谱、大入射角度的增透, 反射率随沟槽深度的变化不再显示周期性, 而且反射率达到零以后波动很小, 所以栅格高度的误差对反射率的影响也非常小。图 2(c) 为入射角度对反射率的影响。可见当表面浮雕结构的高度和周期一定时, 反射率随入射角的增大而增大。图 2(d) 为透射率与占空比之间的关系。透射率最高点附近曲线平滑, 占空比改变 0.1 时, 最高透射率仅变化 2%。计算结果表明, 当光栅周期远小于波长时, 等效介质理论可以有效地分析亚波长光栅的增透性能, 所以不同面型不影响光栅的透过性能。当 $T < 0.4\lambda$ 时, 正方形和圆柱面型的亚波长光栅反射率相同^[4]。

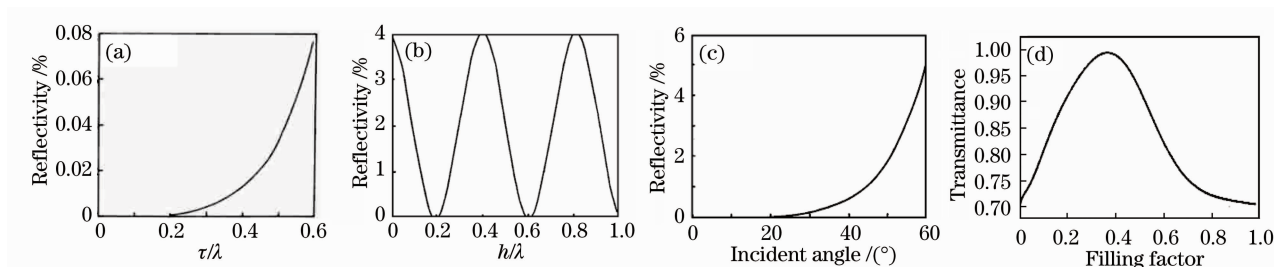


图 2 周期、栅格高度、入射角度对于反射率的影响; 占空比变化对透射率的影响。(a) $f_x = f_y = 0.7, h = 0.205\lambda$, 正入射时反射率随 T/λ 的变化, (b) $T_x = T_y = 0.1\lambda, f_x = f_y = 0.7$, 正入射时反射率随 h/λ 的变化, (c) $T_x = T_y = 0.1\lambda, f_x = f_y = 0.7, h = 0.2\lambda$, (d) $T_x = T_y = 0.3, f = 0.16\lambda, n = 3.4$ 时透射率随占空比的变化规律

Fig. 2 Relation between reflectivity and period, height, incident angle; the relation between transmission and filling factor.

(a) $f_x = f_y = 0.7, h = 0.205\lambda$, reflectivity changes with T/λ for normal incidence, (b) $T_x = T_y = 0.1\lambda, f_x = f_y = 0.7$, reflectivity changes with h/λ for normal incidence, (c) $T_x = T_y = 0.1\lambda, f_x = f_y = 0.7, h = 0.2\lambda$, (d) $T_x = T_y = 0.3, f = 0.16\lambda, n = 3.4$

3 光栅的制备及减反射性能

亚波长光栅制备的主要技术包括掩模制作技术和刻蚀技术。如图 3 所示, 掩模图样的设计是已知成像系统的入射场和输出场, 计算所需的亚波长光栅的相位分布, 给出掩模图样。掩模的制备方法主要有照相平版印刷术和纳米平版印刷术。照相平版印刷术主要有: 1) 掩模曝光技术, 通过现有的掩模板曝光; 2) 直写技术, 通过曝光基底上的光刻胶, 制备工艺更加简捷。照相平版印刷术可以通过光学曝光, 主要利用紫外、深紫

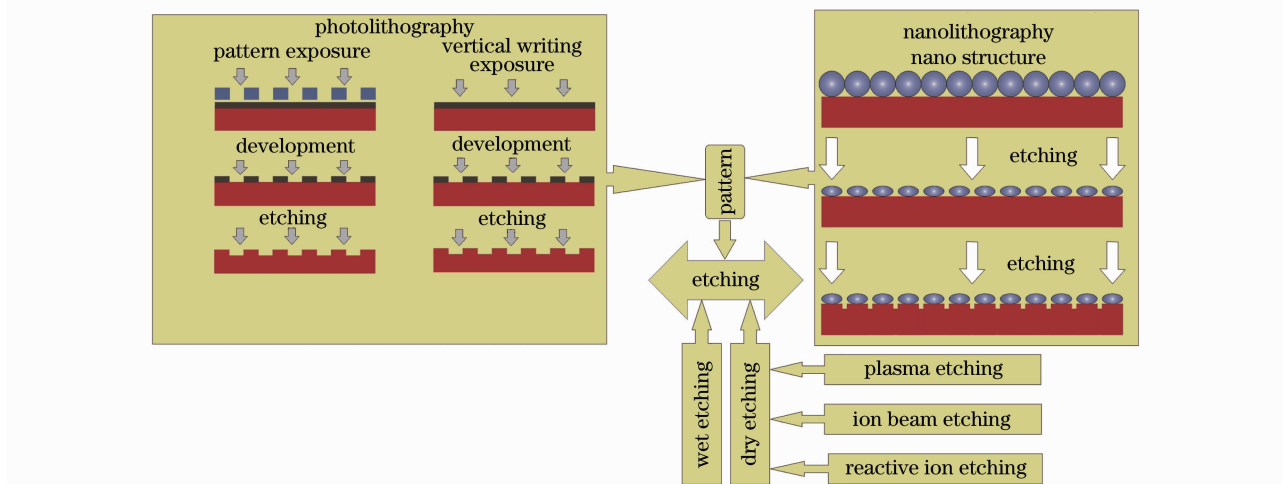


图 3 亚波长光栅的制备技术

Fig. 3 Fabrication of sub-wavelength grating

外曝光;也可以利用电子束曝光。利用紫外激光曝光方法由于受到光学衍射极限的限制,当亚波长减反射光栅的特征尺寸小于 $\lambda/2$ 时,照相平板技术将受到限制。而利用电子束曝光或深紫外激光曝光虽然能制备更小周期的亚波长光栅但是造价高昂,应用范围受到限制。近来出现的纳米平版印刷术被认为是有望代替照相平版印刷术,克服光学衍射极限的技术。纳米平版印刷术利用纳米结构作为光栅刻蚀模板。纳米量级的微球组装的胶体晶体,由于其价格低廉、容易制备常常被应用到纳米平版印刷术中。

3.1 大面积低缺陷密度的胶体晶体模板技术

J. Rybczynski 等^[12,13]利用气液界面组装法(gas-liquid interface assembly)成功地制备出大面积的单层胶体晶体模板。图4所示为文献[12]利用气液界面组装法制备的大面积高质量聚苯乙烯(PS)单层胶体晶体模板,最大无缺陷面积达到 $100\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}$,其中图4(a)为有序单晶区域的原子力显微镜(AFM)图;图4(b)为光学图,根据布拉格衍射公式,图中均匀蓝色代表了大面积高度有序的微球阵列;图4(c)为表征有序微球阵列的快速傅里叶变换图(FFT),相邻3个亮斑组成等边三角形代表了微球阵列排列的高度有序性^[12,13]。A. S. Dimitrov 等^[14,15]利用提拉法(dip-coating)制备大面积二维胶体晶体模板,表明提拉法是制备单层胶体晶体模板非常有效的方法。图5(a)为 X. Yang 等^[16]利用软模板法制备的紧密堆积(close-packed)单层胶体晶体,图5(b)为非紧密堆积(non-closed-packed, NCP)单层胶体晶体模板,右上角为模板的快速傅里叶变换图。图5(c)为532 nm激光器照射下非紧密堆积单层胶体晶体的六角衍射斑。P. Jiang 等^[17]利用旋涂法制备大面积非紧密堆积的二维胶体晶体模板,如图6所示,图中左上角为白光照射下单层胶体晶体的六角光柱,表征了大区域(厘米量级)胶体晶体的有序度,右上角为高放大倍数SEM图,右下角为单层胶体晶体的快速傅里叶变换图。他们所制备的非紧密堆积单层胶体晶体可以直接作为亚波长光栅的掩模。目前大面积低缺陷密度的单层胶体晶体模板已达到厘米量级均匀、最大无缺陷面积 $100\ \mu\text{m}$ 量级,可以满足亚波长减反射光栅模板的需求。

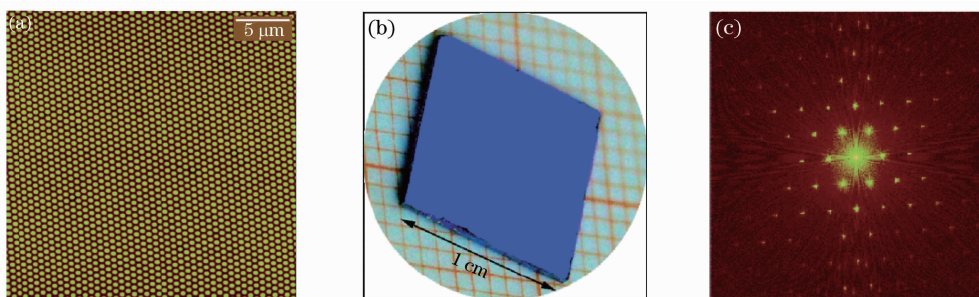


图4 利用气液界面组装法在硅基片上制备的大面积单层聚苯乙烯胶体晶体模板

Fig. 4 Template of prepared large domain monolayer polystyrene colloidal crystal on the silicon by gas-liquid interface assembly

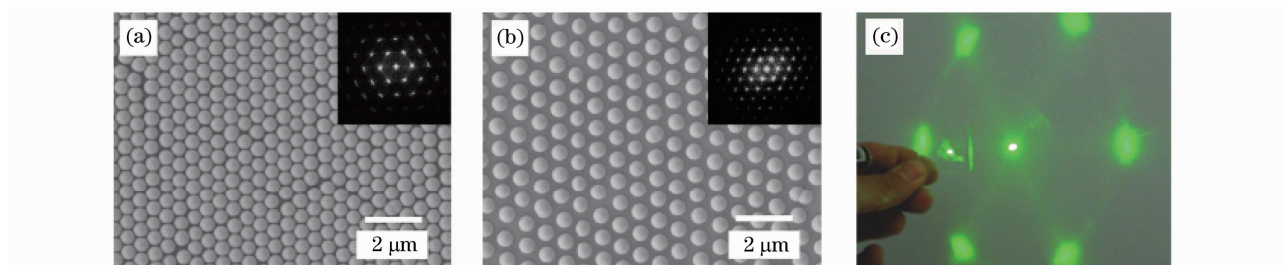


图5 利用软模板法制备单层胶体晶体模板扫描电镜图

Fig. 5 SEM image of prepared monolayer colloidal crystal by soft lithography

3.2 基于胶体晶体模板的亚波长减反射光栅制备及减反射性质

利用单层胶体晶体模板制备亚波长减反射光栅,并研究它的减反射性能,Y. Zhao 等^[18]所做的关于单层聚苯乙烯胶体晶体的减反射特性的研究表明胶体晶体亚波长纳米结构的减反射效果能在可见光波段提高

4%~5%。W. L. Min 等^[19]利用非紧密堆积单层胶体晶体模板制备了亚波长减反射光栅,研究了它们的减反射性能。图 7 为利用非紧密堆积胶体晶体模板分别在 GaAs, Si, 玻璃上刻蚀的亚波长减反射光栅及垂直入射光栅时的反射谱,其中上面为亚波长光栅,下面为反射谱,图 7(a)为 GaAs 基底上刻蚀的奶头状亚波长减反射光栅;图 7(b)为 Si 基片上柱状亚波长减反射光栅;图 7(c)为玻璃基片上柱状亚波长减反射光栅。利用单层胶体晶体模板制备的亚波长减反射光栅在宽光谱范围内具有很好的减反射效果,而且光栅周期最小可以达到 200 nm 以下,不受光学衍射极限的限制,可以使亚波长减反射光栅的应用延伸到可见光、紫外波段。

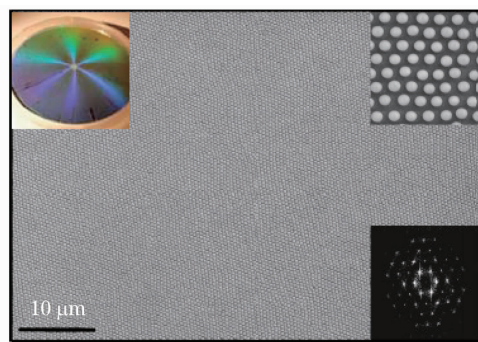


图 6 通过旋涂法制备的非紧密堆积单层胶体晶体的 SEM 图

Fig. 6 SEM image of fabricated NCP monolayer colloidal crystal by spin-coating

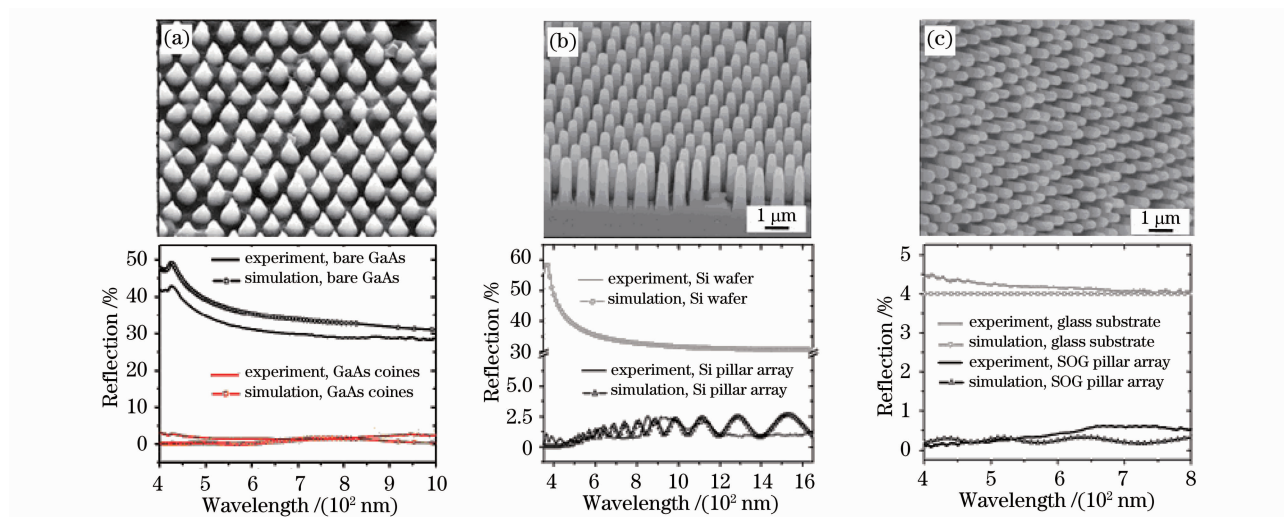


图 7 亚波长减反射光栅的 SEM 图(上)及其垂直入射时的反射谱(下)

Fig. 7 SEM image of sub-wavelength antireflection grating and reflectance spectrum of the corresponding grating

3.3 影响减反射性能的因素

不同结构参数的亚波长减反射光栅有不同的减反射效果,周期可以通过胶体微球粒径来调节;占空比可以通过制备非紧密堆积的胶体晶体模板或刻蚀参数来控制;深度可以通过刻蚀的参数来控制;光栅面型可以通过胶体晶体模板图案控制和刻蚀参数来控制。

C. H. Sun 等^[20]模拟计算了不同粒径胶体晶体模板的亚波长减反射光栅的反射谱。图 8(a)为模拟计算的以粒径分布 200~500 nm 的二氧化硅胶体晶体为模板制备的亚波长减反射光栅垂直入射的反射谱,粒径不同代表了不同的周期,其中模板粒子小反射峰出现在长波长,而模板粒子大反射峰出现在短波长。H. L. Chen 等^[21]设计并利用提拉法制备的单层胶体晶体模板通过两步反应粒子刻蚀在硅基底上制备柱型亚波长减反射光栅;通过一步反应粒子刻蚀制备了金字塔型的亚波长减反射光栅。图 8(b)为 3 种亚波长光栅垂直入射的反射谱。图 8(c), (d)是周期分别为 350 nm, 200 nm 的亚波长减反射光栅的 SEM 图,图 8(e)是周期为 200 nm 的双层胶体晶体模板以及以此为模板制备亚波长减反射光栅结构。

图 9 为通过一步混合气体反应粒子刻蚀制备的亚波长减反射光栅侧视图(上图)与俯视图(下图),周期为 310 nm,刻蚀时间分别为(a)30 s, (b)60 s, (c)100 s, (d)150 s。不同的刻蚀时间对应不同的栅格面型及占空比,存在不同的反射谱,如图 9(e)所示。研究表明,通过改变亚波长减反射光栅的结构参数,在宽光谱范围内达到很好的减反射效果的基础上还可以在某些窄波段达到更高的减反射效率。当光栅周期小至一定程度,等效折射率代替结构的有序性成为影响减反射效率的主要因素,此时光栅调制层可以等效为介质薄

膜,可以利用等效介质理论解释这种无序纳米结构的减反射效果。

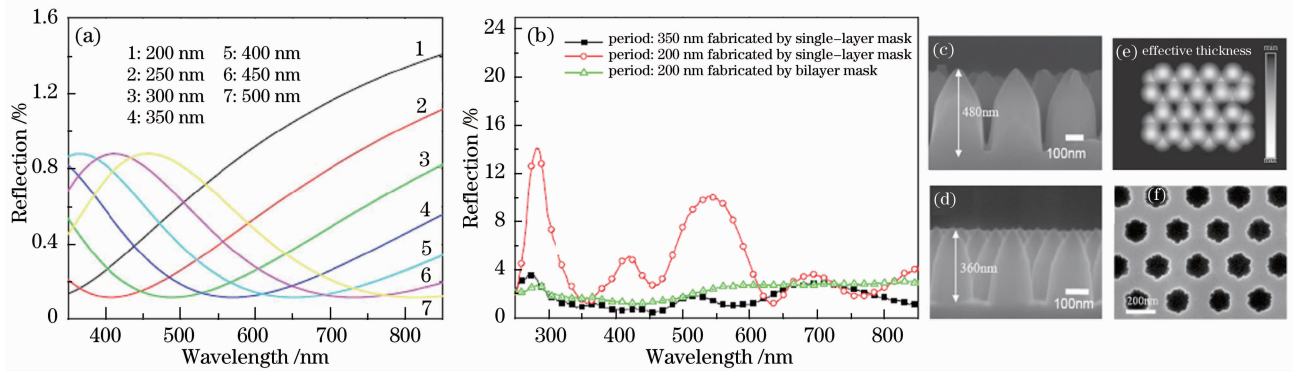


图 8 不同胶体晶体模板下亚波长减反射光栅的反射谱及 SEM 图

Fig. 8 Reflectance spectrum and SEM image of sub-wavelength antireflection grating based on various colloidal crystal pattern

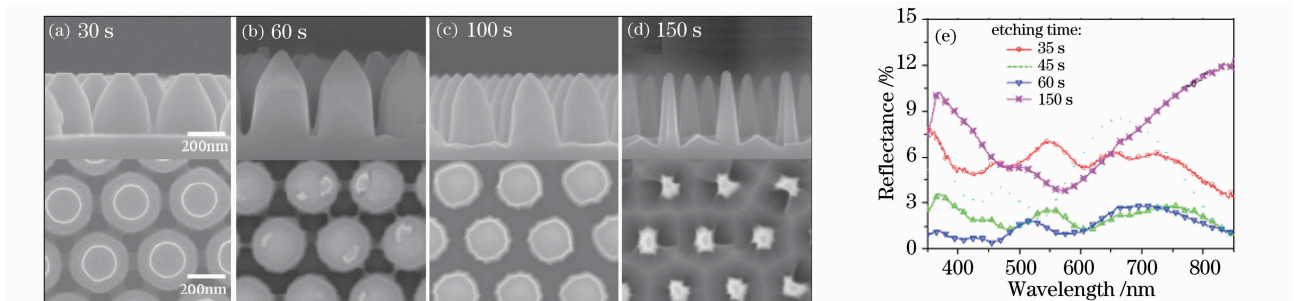


图 9 不同刻蚀时间的亚波长透光栅面型 SEM 图及垂直入射的反射谱

Fig. 9 SEM images of the sub-wavelength transmission grating obtained after different etching time using the one-step etching process and measured normal incidence reflectance spectrum

4 亚波长减反射光栅的应用

以光学照相平板技术为基础制备的亚波长减反射光栅,由于受到光学衍射极限的限制,目前主要的应用集中在红外及微波波段,电子束刻蚀造价高昂所以适用性不高,而以纳米平板技术为基础制备的亚波长减反射光栅备受关注。目前基于纳米平版印刷术的亚波长减反射光栅主要以半导体基底如 Si, GaAs 等为主,也有研究者研究过玻璃基底上的亚波长减反射光栅。前一种亚波长减反射光栅主要应用在太阳能电池及其他半导体领域。玻璃基底上的亚波长减反射光栅可以替代光学增透膜。目前光学元件中用于减反射的主要是光学薄膜,但是介质膜损伤阈值低,在大功率激光器中的应用受到限制^[22,23];化学膜不稳定,表面存在纳米量级微小开孔,容易吸附有机物质,改变折射率影响减反射特性和光束质量,使光学薄膜的应用环境受到很大的限制;光学薄膜的制备受到材料折射率的限制,使得光学薄膜的制备造价高,一定程度制约它的应用。亚波长减反射光栅作为可能替代光学薄膜实现增透的光学结构备受关注,并取得了很大的突破。将亚波长减反射光栅与传统光学和传统光学元件相结合,在传统光学上刻蚀亚波长浮雕结构,可以实现其减反射功能。F. Nikolajeff 等^[24]在闪耀光栅上刻写亚波长光栅代替增透膜,取得了很好的减反射效果。将亚波长光栅的减反射特性与谐波分离结合应用到激光器谐振腔中制成谐振亚波长光栅,利用其高透射、窄透射谱的优点同时实现减反射与谐波分离双重功效,可以简化激光器的复杂结构,这可能是一种光学元件发展的趋势。D. W. Peters 等^[25]设计的谐振亚波长光栅可以用来选模;J. N. Yih 等^[26]将谐振亚波长光栅应用在生物传感器上。将亚波长光栅用到光纤耦合器上,渐变亚波长光栅以改变介质折射率实现耦合,利用亚波长光栅的减反射特性提高衍射效率,降低耦合过程中的损耗,简化耦合器的结构^[27]。亚波长减反射光栅由于直接在基底上刻蚀出特征结构,受到激光辐照时能避免脱落,而且可能达到本征材料的损伤阈值。如图 10 所示,D. S. Hobbs 等^[28]的研究表明具有亚波长减反射表面对光学元件的激光损伤阈值(LDT)有很大的提高。未经处

理的光学玻璃损伤阈值 38.3 J/cm^2 , 表面带有亚波长减反射结构的光学元件损伤阈值接近 60 J/cm^2 。研究表明, 带有亚波长减反射表面的光学元件其损伤阈值是单层光学薄膜的 3 倍。受制备技术的限制, 目前亚波长减反射光栅主要应用在红外及微波领域, 对于可见光和紫外波段的亚波长减反射光栅的应用较少。

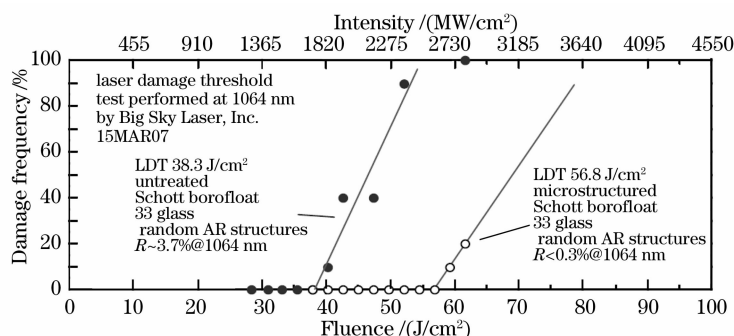


图 10 表面存在和不存在减反射微结构的光学元件激光损伤阈值测试

Fig. 10 Results of laser damage threshold on Schott glass windows with and without AR microstructures

5 前景与展望

亚波长减反射光栅有广泛的应用前景, 对亚波长减反射光栅的研究, 不仅丰富了亚波长光栅理论, 更推动了微光学、二元光学的学科发展。但是对于亚波长减反射光栅的研究目前还有很多工作需要进行, 矢量衍射理论是准确的无疑也是极其复杂的, 寻求一个在亚波长范围内普遍适合的等效近似理论是当前应该做的工作。制备工艺研究中, 为了满足不同性能要求设计并制备各种微结构的亚波长减反射光栅; 以二维胶体晶体模板技术为基础, 亚波长减反射光栅在可见光、紫外波段的应用将得到很大的发展。亚波长减反射光栅与传统的基于光学薄膜和基底结合的光学元件不同, 它直接在基底上制作出功能性微结构, 光学元件由单一或少数几种材料构成, 在制备的过程中引入的异质缺陷极少, 有可能使得元件的损伤阈值提高并接近材料的本征损伤阈值, 提高光学元件的整体负载水平。亚波长减反射光栅的微结构特征尺寸在几十纳米, 它的吸附性能相对于化学膜降低很多, 可以大大降低吸附污染对光学元件减反射带来的影响, 提高光学元件减反射的稳定性。理论上的减反射效率能达到 100%, 可能替代光学薄膜实现光学元件的增透, 而且同时起到减反射、谐波分离、提高损伤阈值的作用, 即可以简化光学系统的结构, 还能应用于高功率激光领域。

参 考 文 献

- 1 G. M. Lerman, U. Levy. Generation of a radially polarized light beam using space-variant subwavelength gratings at 1064 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(23): 2782~2784
- 2 B. Hou, W. J. Wen. Transmission resonances of electromagnetic wave through metallic gratings: phase and field characterizations[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(21): 17098~17106
- 3 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
- 4 Cao Zaoliang, Lu Zhenwu, Li Fengyou *et al.*. 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
- 5 M. G. Moharam, T. K. Gaylord. Coupled-wave analysis of reflection gratings[J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(2): 240~244
- 6 E. Noponen, J. Turunen. Eigenmode method for electromagnetic synthesis of diffractive elements with three-dimensional profiles[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(9): 2494~2502
- 7 J. J. Zheng, C. H. Zhou, B. Wang *et al.*. Beam splitting of low-contrast binary gratings under second Bragg angle incidence [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2008, **25**(5): 1075~1083
- 8 T. K. Gaylord, M. G. Moharam. Planar dielectric grating diffraction theories[J]. *Appl. Phys. B*, 1982, **28**(1): 1~14
- 9 H. Kikuta, Y. Ohira, H. Kubo *et al.*. Effective medium theory of two-dimensional subwavelength gratings in the non-quasi-

- static limit[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1998, **15**(6): 1577~1585
- 10 Yu Weixing, Lu Zhenwu, Wang Peng *et al.*. Vector analysis of two-dimensional surface-relief structure diffraction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8): 980~986
鱼卫星, 卢振武, 王 鹏 等. 二维表面浮雕结构的矢量衍射分析[J]. 光学学报, 2001, **21**(8): 980~986
- 11 Cao Zaoliang, Lu Zhenwu, Li Fengyou *et al.*. Analysis of fabrication error of subwavelength dielectric gratings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 76~80
曹召良, 卢振武, 李凤有 等. 亚波长介质光栅的制作误差分析[J]. 光子学报, 2004, **33**(1): 76~80
- 12 J. Rybczynski, U. Ebels, M. Giersig *et al.*. Large-scale, 2D arrays of magnetic nanoparticles[J]. *Colloids Surf., A: Physicochem. Eng. Aspects*, 2003, **219**(1-3): 1~7
- 13 X. D. Wang, C. J. Summers, Z. L. Wang. Large-scale hexagonal-patterned growth of aligned ZnO nanorods for nano-optoelectronics and nanosensor arrays[J]. *Nano Lett.*, 2004, **4**(3): 423~426
- 14 A. S. Dimitrov, K. Nagayama. Continuous convective assembling of fine particles into two-dimensional arrays on solid surfaces[J]. *Langmuir*, 1996, **12**(5): 1303~1311
- 15 G. Zhang, D. Y. Wang, Z. Z. Gu *et al.*. Two-dimensional non-close-packing arrays derived from self-assembly of biomineralized hydrogel spheres and their patterning applications[J]. *Chem. Mater.*, 2005, **17**(21): 5268~5274
- 16 X. Yan, J. M. Yao, B. Yang *et al.*. Fabrication of non-close-packed arrays of colloidal spheres by soft lithography[J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2005, **127**(21): 7688~7689
- 17 P. Jiang, M. J. McFarland. Wafer-scale periodic nanohole arrays templated from two-dimensional non-close-packed colloidal crystals[J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2005, **127**: 3710~3711
- 18 Y. Zhao, J. S. Wang, G. Z. Mao. Colloidal subwavelength nanostructures for antireflection optical coatings[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(14): 1885~1887
- 19 W. L. Min, B. Jiang, P. Jiang. Bioinspired self-cleaning antireflection coatings[J]. *Adv. Mater.*, 2008, **20**: 3914~3918
- 20 C. H. Sun, P. Jiang, B. Jiang. Templated biomimetic multifunctional coatings[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(5): 051107
- 21 H. L. Chen, S. Y. Chuang, C. H. Lin *et al.*. Using colloidal lithography to fabricate and optimize sub-wavelength pyramidal and honeycomb structures in solar cells[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(22): 14793~14803
- 22 Fan Zhengxiu, Wei Zhaoyang. Progress and development trends of optical coatings in high power laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(7): 14~17
范正修, 魏朝阳. 高功率激光系统中光学薄膜的现状与发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(7): 14~17
- 23 Tian Junlin, Shen Lin, Zhang Yundong *et al.*. Research progress of deep-ultraviolet optical coatings [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(3): 50~56
田俊林, 申 林, 张云洞 等. 深紫外波段光学薄膜研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(3): 50~56
- 24 F. Nikolajeff, M. Johansson, C. Heine *et al.*. Fabrication and simulation of diffractive optical elements with superimposed antireflection subwavelength gratings[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(26): 4842~4846
- 25 D. W. Peters, S. A. Kemme, G. R. Hadley *et al.*. Effect of finite grating, waveguide width, and end-facet geometry on resonant subwavelength grating reflectivity[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2004, **21**(6): 981~987
- 26 J. N. Yih, Y. M. Chu, Y. C. Mao *et al.*. Optical waveguide biosensors constructed with subwavelength gratings[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(9): 1938~1942
- 27 P. Cheben, D. X. Xu, S. Janz *et al.*. Subwavelength waveguide grating for mode conversion and light coupling in integrated optics[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(11): 4695~4702
- 28 D. S. Hobbs, B. D. MacLeod, J. R. Riccobono. Update on the development of high performance anti-reflecting surface relief micro-structures[C]. *SPIE*, 2007, **6545**: 65450Y