doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2020.05.012

基于写入型光盘反射式相位光栅的衍射特性

郎咸忠[1],吴　钦[2],马　骥[1],唐　斌[1],苏江滨[1],蒋美萍[1]

(1.常州大学 数理学院,江苏 常州 213164;2.常州市第一中学 物理部,江苏 常州 213003)

摘要:对基于一次性写入型光盘的反射式相位光栅的微观结构和背向衍射特性进行研究。利用简单地剥离普通光盘的方法,获得了光栅常数分别为 1 524,751,335 nm 的自制聚碳酸酯相位光栅。分别对这 3 种自制光栅的背向衍射特性进行比较分析,发现 CD-R 和 DVD-R 光栅的衍射光谱在可见光区域,而 BD-R 相位光栅的衍射光谱在近紫外区域;CD-R 相位光栅存在叠级现象,并且衍射级次越大,角分辨率越大;这 3 种光栅的衍射光谱的各个衍射峰与偏向角呈现近似线性关系,并且随着光栅常数的减小,同级衍射光谱角分辨率增大,最大角分辨率为 0.333(°)/nm。另外,当入射光波长大于光栅常数波长时,DVD-R 和 BD-R 相位光栅相当于亚波长光栅,仅存在 0 级衍射波。

关键词:相位光栅;衍射;光盘;角分辨率

中图分类号:O 436.1　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2095-0411(2020)05-0088-05

Diffraction Characteristics of Reflection Phase Gratings Based on Write-Once Optical Discs

LANG Xianzhong[1], WU Qin[2], MA Ji[1], TANG Bin[1], SU Jiangbin[1], JIANG Meiping[1]

(1. School of Mathematics and Physics, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Teaching and Research Group of Physics, Changzhou No.1 High School, Changzhou 213003, China)

Abstract: Reflection phase gratings based on write-once optical discs are proposed. Their morphology and backward diffraction characteristics are investigated. Home-made phase gratings with well-defined spacing about 1 524, 751, 335 nm are readily produced by pulling off ordinary optical discs. The backward diffraction characteristics of three phase gratings are compared. The research results show that diffraction phenomena of CD-R, DVD-R and BD-R gratings are observed in visible, visible-NIR and ultraviolet regions, respectively; successive spectra overlap are observed in diffraction spectra of the CD-R grating and angular dispersion of diffraction spectra increases as the diffraction order increases;

收稿日期:2020-04-01。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51501018);江苏省高等学校自然科学研究面上项目(18KJB430003);常州大学信息数理学院教育教学研究课题(2017XSJY06)。

作者简介:郎咸忠(1984—),男,山东潍坊人,博士,讲师。E-mail:xzlang@cczu.edu.cn

引用本文:郎咸忠,吴钦,马骥,等.基于写入型光盘反射式相位光栅的衍射特性[J].常州大学学报(自然科学版),2020,32(5):88-92.

diffraction angle of the three gratings is linearly proportional to the diffraction peak, angular dispersion increases as the grating constants decreases and the maximum angular dispersion is 0.333(°)/nm. In addition, when wavelength of incident light is more than the grating period, there is only zero-order diffraction wave in diffraction spectra of the DVD-R and BD-R subwavelength gratings.
Key words: phase grating; diffraction; optical disc; angular dispersion

衍射光栅是能够对入射电磁波的相位或振幅(或两者同时)进行周期性空间调制的重要分光元件。这种周期性微纳光栅结构具有独特的光学特性,例如表面等离激元特性、光波导特性、减反射特性等。近年来,在生物化工、食品安全、能源环境、集成光学等领域有着很广阔的应用前景[1-3]。这些特性和应用微纳结构对辐照在其表面的电磁波进行调控。常规的制备该周期性微纳光栅结构方法包括电子束刻蚀[4]、聚焦离子束刻蚀[5]、光刻[6]等技术,但是这些制备手段工艺繁琐、造价昂贵、难以大规模生产和应用,致使微纳光栅结构的大规模商用受到一定限制[7]。

光盘盘面面积大、成本低,可以高效率地制备周期性微纳光栅结构,因而备受关注,并在几何光学、光电子器件和生物医学等领域有着潜在的应用[8-9]。最近,课题组利用低成本的 CD-R 光盘聚碳酸酯(Polycarbonate,PC)层表面的一维微纳结构[10],大面积制备出表面等离激元共振液相折射率传感基底。其中,光盘 PC 层的微纳结构决定了其表面的光能量的分布和应用特性。因此,对光盘 PC 层的本身的光学特性进行系统研究具有非常重要的意义。然而,该领域系统的研究报道较少。本文利用角分辨系统对 3 种不同光存储密度的写入型光盘的 PC 层的背向(与入射光方向相反)光散射特性进行研究。

1 实验部分

1.1 样品处理

根据 3 种写入型光盘的结构异同,采取了 3 种相近的手段分离和提取光盘的 PC 层。对于 CD-R (sony/700 MB)和 DVD-R(sony/4.7 GB),首先利用物理剥离的手段将染料/PC 复合层分别从光盘上剥离,然后将该复合结构在乙醇溶液中超声清洗 15 min,以去除表面染料层[9],再用去离子水清洗干净并吹干,从而得到 CD-R 和 DVD-R 光盘上透明的 PC 层。对于 BD-R(Sony/25 GB),首先利用物理剥离的手段去除表面的保护层,然后将金属/PC 复合层置于盐酸中浸泡 2 h,再用去离子水清洗干净,然后将在乙醇溶液中超声清洗 15 min 并吹干,从而获得 BD-R 光盘的 PC 层。

1.2 样品的形貌和光谱表征

用日本 JEOL 公司的 JSM-633F 型场发射扫描电子显微镜(SEM)对 3 种光盘的 PC 层进行形貌表征。用上海复享公司的 R1 角分辨光谱系统对 PC 层的散射特性进行检测,光信号被分解到各个角度,并被逐个采集。光源为卤素灯,测试 BD 光谱时外加氘灯对紫外波段光进行补强。探测器采用高分辨制冷型背照式 CCD 光纤光谱仪,波长分辨率小于 2 nm,光谱分辨率波段光谱测量范围为 200～1 000 nm;精密滑台角分辨率为 1°,检测角度的探测范围为 0～90°,测量散射光平面垂直于光盘轴向。

2 结果与讨论

2.1 基于写入型光盘的反射式相位光栅的微结构表征

光盘的盘面是由多层材料复合而成,主要包括对盘体起到保护和支撑作用的透明的 PC 层、记录信

息的染料层和反射金属层[9]。图 1 为剥离 3 种光盘获得的 PC 层的 SEM 图像,可见 3 种光盘的 PC 层具有相似的预刻槽轨道,这些轨道沿半径方向呈现一维反射式相位光栅结构。CD-R,DVD-R 和 BD-R 的光栅常数(d)平均值分别为 1 524,751,335 nm,这与通常认知的数据存储密度相一致。

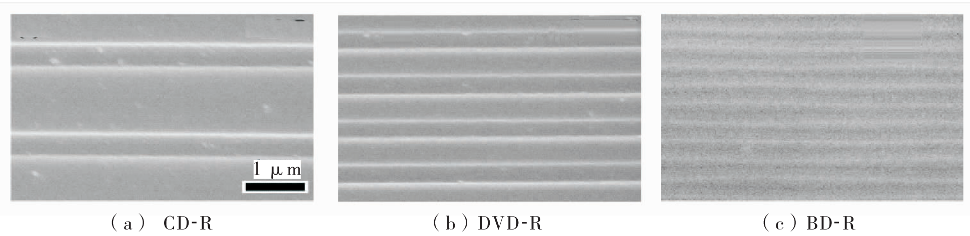


图 1 3 种光盘 PC 层的 SEM 图

Fig.1 SEM images acquired from the three optical disc

2.2 基于写入型光盘的反射式相位光栅的衍射光谱

首先对 3 种光盘相位光栅的背向衍射光谱进行研究。为了便于观察和分析,根据衍射级次进行分类分析(如图 2 所示)。当入射角为 0°时,在近紫外-可见-近红外(200~1 000 nm)检测波段范围内,3 种光盘相位光栅在特定辐射方向上出现了衍射分光现象,但 3 者之间存在明显差别。如图 2(a)、图 2(d)和图 2(f)所示,CD-R,DVD-R 和 BD-R 相位光栅分别在偏向角(θ)为 0~15°,0~30°和 0~41°角度检测范围内,未出现色散现象,并且随着角度的增加,复色光迅速变弱。随着角度的增大,CD-R,DVD-R 和 BD-R 相位光栅分别在 θ=16°~88°,31°~90°和 42°~73°出现了分光现象(图 2(b)、图 2(c)、图 2(e)和图 2(g))。在该测量系统中,CD-R 相位光栅可观测到多级衍射(图 2(b)和图 2(c)),而 DVD-R 和 BD-R 相位光栅仅可观测到 1 级衍射(图 2(e)和图 2(g))。

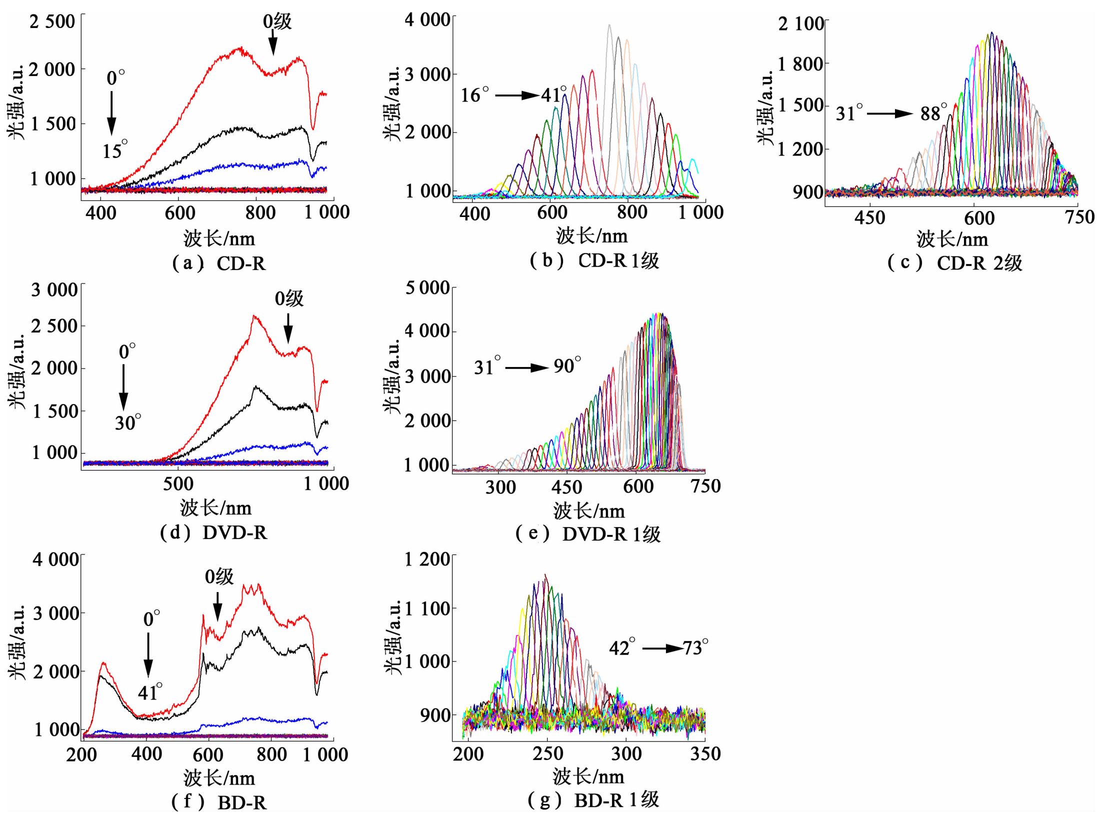


图 2 空气中光盘 PC 层不同角度的背向衍射光谱

Fig.2 Backward diffraction spectra of the PC layer in air at different angle

对于 CD-R 相位光栅，1 和 2 级衍射光谱的 θ 范围分别为 16°～41°(416～972 nm(检测上限受仪器检测范围限制))和 31°～82°(385～734 nm)，并且 1 级衍射光谱衍射效率明显高于 2 级衍射光谱。另外，衍射光谱存在叠级现象，谱线交叠发生在 $\theta=31°\sim41°$，相应的自由光谱范围分别为 416～741 nm ($\theta=16°\sim30°$)和 498～734 nm($\theta=42°\sim82°$)，可见 2 个自由光谱范围基本覆盖可见区。对于 DVD-R 和 BD-R 相位光栅(图 2(e)和图 2(g))，1 级衍射光谱的 θ 范围分别为 31°～90°(378～738 nm)和 42°～73°(213～303 nm)。可见随着光栅常数的减小，光谱覆盖范围减小。从光栅分光范围分析来看，CD-R，DVD-R 的 PC 层适于可见光范围分光，而 BD-R 适于近紫外范围分光。另外，值得注意的是，当光栅常数波长小于入射光波长时，DVD-R 和 BD-R 相位光栅仅存在 0 级衍射波，该现象可归因于亚波长微纳结构相当于一层等效介质，无法发生干涉[2]。

可利用简化的标量衍射理论分析光盘相位光栅的分光现象[11-12]。设一束平行宽带复色光照射在反射矩形位相光栅后，复合光将按波长分开(如图 3 所示)，其遵循光栅方程

$$d(\sin i \pm \sin\theta)=k\lambda \quad (k=0,\pm1,\pm2\cdots) \tag{1}$$

入射角则为 $i=0°$，则由式(1)得光栅常数

$$d=\frac{k\lambda}{\sin\theta} \quad (k=0,\pm1,\pm2\cdots) \tag{2}$$

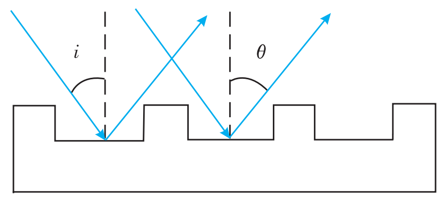
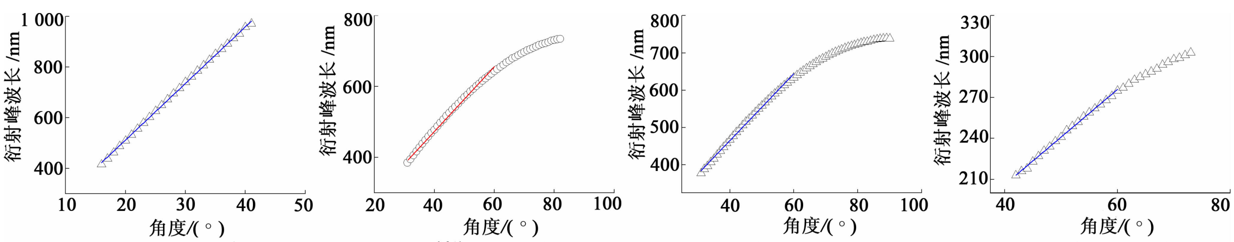


图 3　反射式相位衍射光栅原理图

Fig.3　Schematic of reflective phase diffraction grating

由式(2)和图 2 可分别计算得到 CD-R，DVD-R 和 BD-R 的光栅常数 $d_{CD}=(1\ 472.6\pm11.7)$ nm，$d_{DVD}=(732.3\pm3.5)$ nm 和 $d_{BD}=(316.3\pm0.9)$ nm，其中 d_{CD} 由 CD-R 的 1 和 2 级衍射光盘得到。实验形貌测量和计算得到的光栅常数相对误差分别为 $\delta_{CD}=3.4\%$，$\delta_{DVD}=2.5\%$，$\delta_{BD}=5.6\%$，可见理论和实验结果相符。

为了进一步研究光盘光栅的衍射分光性能，分析了衍射峰(λ)和偏向角(θ)的关系(如图 4 所示)。可见所有光谱各 λ 与 θ 呈现近似线性关系，说明了光盘光栅光谱近似均匀排列。对部分数据进一步线性拟合发现(图 4 中实线)，CD-R 光栅的 1 级衍射的关系式为 $\lambda_{CD1}=22\theta+66$，拟合度 R^2_{CD1} 的值为 0.999 36，CD-R 光栅的 2 级衍射(31°～60°)关系式为 $\lambda_{CD2}=9\theta+108$，拟合度 R^2_{CD2} 的值为 0.994 95；DVD-R 光栅的 1 级衍射(31°～60°)关系式为 $\lambda_{DVD}=9\theta+108$，拟合度 R^2_{DVD} 的值为 0.996 41；BD-R 光栅的 1 级衍射(42°～60°)关系式为 $\lambda_{BD}=3\theta+66$，拟合度 R^2_{BD} 的值为 0.997 86。这说明在较大偏向角范围内，λ 与 θ 线性度非常好。



(a) CD-R 1级　(b) CD-R 2级　(c) DVD-R 1级　(d) BD-R 1级

图 4　光盘的 PC 层的衍射峰和偏向角的关系

Fig.4　Diffraction peaks as a function of deviation angles of diffraction light

为了研究光盘光栅的分辨能力的基本特性，引入光栅角色散率(D)。根据其定义式 $D=\Delta\theta/\Delta\lambda$，其中 $\Delta\theta$ 为同级光谱中 2 个衍射峰对应的偏向角之差，$\Delta\lambda$ 为 2 个衍射峰波长差。设 CD-R 光栅 1 和 2 级衍射角色散率分别为 D_{CD1} 和 D_{CD2}，DVD-R 和 BD-R 光栅 1 级衍射角色散率分别为 D_{DVD} 和 D_{BD}。由拟合线可知 $D_{CD1}\approx0.045$(°)/nm，$D_{CD2}\approx0.111$(°)/nm，$D_{DVD}\approx0.111$(°)/nm，$D_{BD}\approx0.333$(°)/nm。可见

$D_{CD1} < D_{CD2}$，即 CD 光盘的 2 级衍射角分辨能力优于 1 级衍射的角分辨能力。$D_{CD1} < D_{DVD} < D_{BD}$，即对于同级衍射，刻线数越大，$D$ 越大。

将(1)式带入 D 定义式得

$$D = \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} = \frac{k}{d\cos\theta} \tag{3}$$

可见，D 与 k 成正比；当 θ 很小，D 近似一个常数。这些结论和图 4 中实验数据是相符的。

3 结 论

利用简单地剥离 CD-R，DVD-R 和 BD-R 光盘的方法，获得了光栅常数分别为 1 524，751，335 nm 的透明相位光栅。对这 3 种光栅的背向衍射特性进行研究，发现 CD-R 和 DVD-R 相位光栅的衍射光谱在可见区域，而 BD-R 相位光栅的衍射光谱在近紫外区域；CD-R 相位光栅存在叠级现象，并且衍射级次越大，角分辨率越大；这 3 种光栅的衍射光谱的各个衍射峰与偏向角呈现近似线性关系，并且随着光栅常数的减小，同级衍射光谱角分辨率增大，最大角分辨率为 0.333(°)/nm。另外，当入射光波长大于光栅常数波长时，DVD-R 和 BD-R 相位光栅相当于亚波长光栅而仅存在 0 级反射波。利用简化理论计算的结果与实验衍射现象相符。该研究为光盘光栅在几何光学、光电子器件、高密度光存储和生物医学等领域的潜在应用提供了研究基础。

参考文献：

[1]STEWART M E，ANDERTON C R，THOMPSON L B，et al. Nanostructured plasmonic sensors[J]. Chemical Reviews，2008，108(2)：494-521.

[2]CHEBEN P，HALIR R，SCHMID J H，et al. Subwavelength integrated photonics[J]. Nature，2018，560(7720)：565-572.

[3]IQBAL T，IJAZ M，JAVAID M，et al. An optimal Au grating structure for light absorption in amorphous silicon thin film solar cell[J]. Plasmonics，2019，14(1)：147-154.

[4]LERTVACHIRAPAIBOONA C，BABAA A，EKGASITB S，et al. Transmission surface plasmon resonance techniques and their potential biosensor applications[J]. Biosensors and Bioelectronics，2018，99：399-415.

[5]GAO Y K，XIN Z M，ZENG B B，et al. Plasmonic interferometric sensor arrays for high-performance label-free biomolecular detection[J]. Lab on a Chip，2013，13(24)：4755-4764.

[6]CAO J J，SUN Y，ZHU H X，et al. Plasmon-enhanced optical transmission at multiple wavelengths through an asymmetric corrugated thin silver film[J]. Plasmonics，2018，13(5)：1549-1554.

[7]BAQUEDANO E，GONZÁLEZ M U，PANIAGUA-DOMÍNGUEZ R，et al. Low-cost and large-sizenanoplasmonic sensor based on Fano resonances with fast response and high sensitivity[J]. Optics Express，2017，25(14)：15967-15976.

[8]IQBAL T，AFSHEEN S. One dimensional plasmonic grating：high sensitive biosensor[J]. Plasmonics，2017，12(1)：19-25.

[9]AVELLA-OLIER M，MORAIS S，CARRASCOSA J，et al. Total analysis systems with thermo-chromic etching discs technology[J]. Analytical Chemistry，2014，86(24)：12037-12046.

[10]陈志伟，郎咸忠，唐斌，等. 大面积银微纳光栅的制备及其表面等离子体共振传感特性研究[J]. 电镀与涂饰，2019，38(7)：311-316.

[11]BAZHANOV Y V，KULAKOVA N A. Analysis of the efficiency of concave diffraction gratings in the scalar approximation[J]. Journal of Optical Technology，2002，69(12)：886-888.

[12]巴音贺希格，齐向东，唐玉国. 位相光栅色散特性的矢量衍射理论分析[J]. 物理学报，2003，52(5)：1157-1161.

(责任编辑：李艳)