

微光学元件宽带光源照明下无色散边界条件探讨*

黄燕燕# 张旭琳# 杨伟 王笑冰 雷蕾 彭文达 徐平†

(深圳大学物理与光电工程学院, 深圳大学微纳光电子技术研究所, 深圳 518060)

(2019年5月10日收到; 2019年8月2日收到修改稿)

基于宽带光源微光学元件(如集成导光板)在衍射色散方面的设计需求, 本文构建了宽带光源微光学元件衍射理论分析模型, 探讨分析了衍射光谱的色度规律特性, 提出并定义了能准确定量衡量衍射光束色散程度的色散量 C , 同时明确给出了零色散的边界判据点. 通过对研制的矩形位相光栅进行测试分析, 所得的光谱色度特性规律与理论分析结果相一致, 实验结果验证了本文提出的色散度判据参量 C 和零色散边界点的正确性. 本文提出的宽带光源色散度判据参量 C 、零色散边界判据点, 不仅为集成导光板结构参数的设计提供指导, 而且也能对其他宽带微光学元件的设计过程中探讨色散特性时提供指导.

关键词: 微光学元件, 宽带光源, 无色散, 集成导光板

PACS: 42.79.-e, 42.25.Fx, 46.40.Cd

DOI: 10.7498/aps.68.20190716

1 引言

众所周知, 衍射微光学元件在窄带光源方面应用广泛^[1-6]. 随着微结构制作工艺的快速发展及微光学元件的集成化, 衍射微光学元件在宽带光源方面的应用也日益广泛, 如将微透镜阵列^[7]、径向光栅^[8]、非对称的衍射光栅^[9]、折射率及高度相互匹配的多层衍射元件^[10]、高深宽比不同占空比的亚波长矩形光栅^[11]等应用于光耦合、光束整形和无色散方面. 本课题组研究设计的一体化导光板也是宽带光源折衍整形、无色散元件^[12], 通过优化设计一体化导光板上下表面的微结构参数及微结构阵列分布方式, 将位于导光板一侧的由点光源白光发光二极管(LED)组成的灯带整形形成高亮度、高光能利用率的均匀白光面光源^[13]. 为了提高背光模组的光能利用率等性能参数, 国内外研究机构在设计新型集成导光板时, 已将其结构特征尺寸由

数十微米发展到微米、亚微米级别, 其设计理论由几何光学到物理光学甚至到矢量理论. 如, 本课题组于2004年就提出上表面熔合二元光学衍射元件阵列的新型导光板^[14]; 清华-富士康纳米科技研究中心提出由应力双折射材料构成的偏振型导光板^[15]; 韩国BK21中心提出上表面为二维光栅点阵型的导光板^[16]; 荷兰的飞利浦欧洲研究院在导光板上表面设置亚波长浮雕光栅^[17,18].

随着新型集成导光板的结构特征尺寸由数十微米向微米、亚微米级别发展, 衍射色散现象必然会成为研究设计无色散LED背光模组的一个突出问题. 故在研究设计新型集成LED背光模组时, 需要预判LED背光模组的出射光场无色散时对应的集成导光板结构特征尺寸的边界点, 以此确定是否需要考虑衍射色散现象. 然而, 研究衍射光学元件的色散问题一般是针对窄带光源的; 针对微光学元件在宽带光源光照条件下的衍射光谱色散特性的一般性规律分析讨论尚未见报道. 因此, 基于研

* 国家自然科学基金(批准号: 61275167)和深圳市基础研究计划(批准号: JCYJ20180305125430954, JCYJ20140418095735591, JCYJ20130329103020637)资助的课题.

共同第一作者.

† 通信作者. E-mail: xuping@szu.edu.cn

究设计新型集成导光板方面的实际所需, 本文探究在宽带光源照射条件下的微光学元件的衍射光谱色散规律特性, 摸索衍射光束无色散边界条件, 为新型集成导光板的参数设计提供指导.

2 物理模型及分析

2.1 宽带光源微光学元件衍射理论模型

本文以典型的一维矩形位相光栅 (rectangular phase grating, RPG) 及普遍使用的白光 LED 光源为模型, 分析讨论微光学元件在宽带光源光照条件下的菲涅尔衍射光谱色度特性, 并摸索衍射光束无色散时的边界条件.

当 LED 线光源与光栅的相对位置和角度不同时, 接收面的衍射光谱也不同. 光栅的任一点位置都可接收到整个 LED 线光源所发出的光; 而光栅的不同位置所接收到的 LED 线光源的光束是不尽相同的, 衍射的光谱也是不同的. 因此, 当考虑所有的情况时, 理论模型将很复杂. 本文将上述物理模型进行简化, 仅讨论 LED 线光源平行于光栅且位于其中间位置, LED 全部光束照射至光栅中间时的光束衍射情况. 构建的理论分析模型如图 1 所示, 其中, a , d , Δh 分别为矩形位相光栅的脊宽、周期、槽深; z 表示观察距离; D 为白光 LED 与矩形位相光栅的距离; l 为 LED 的线宽 (本文仅探讨一维线宽情况); θ 为入射光束锥角 (指的是 LED 光源全线宽 l 发射的光束相对于矩形位相光栅中央被照点的张角); y 轴箭头朝里.

由于菲涅尔衍射理论只适用于单色平行光束, 为了探讨矩形位相光栅在白光 LED 宽带光源光照下的菲涅尔衍射光谱特性, 将其入射光束进行两个方面的简化: 第一, 将光束锥角为 θ 的 LED 光源全线宽 l 发射的入射光束等价成由很多束不同入射方向 (不同入射方向具有不同光强度) 光束锥角 δ 极小的近似细平行光束构成 (细光束的宽度为 Δl), 即该理论模型的入射光束可视为由很多束不同入射方向的细平行光束构成; 第二, 由于白光 LED 是宽光谱特性的, 基于色度学的色光匹配混合原理^[19], 将白光 LED 等价分解成红、绿、蓝三基色的混合光. 因此, 该简化模型称为宽带光源微光学元件衍射理论模型, 其入射光束最终简化等效成由很多束不同入射方向不同强度的三基色细平行光束的叠加.

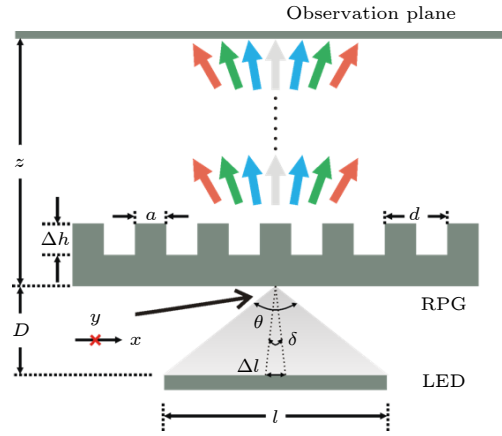


图 1 宽带光源微光学元件衍射理论模型图 (宽带光源为白光 LED, 微光学元件为矩形位相光栅)

Fig. 1. Diffraction theoretical model under the broadband light source illumination. The broadband light source is a white LED, and the microstructure array is the RPG.

2.2 宽带光源微光学元件衍射光场

当宽带光源微光学元件衍射理论模型的入射光束简化之后, 根据菲涅尔衍射理论, 分别计算很多束不同入射方向、不同强度的三基色细平行光束在矩形位相光栅衍射后的光场分布; 然后再综合分析在观察平面上三基色光叠加后的光场及色度特性.

本文应用的白光 LED 线宽 $l = 2.5$ mm, 假定细光束的锥角 $\delta = 0.5^\circ$, LED 入射光束锥角 θ 与 D (LED 与光栅的距离) 直接相关, 即 $\theta = 2 \arctan[l/(2D)]$. 白光 LED 的色品坐标为 $x = 0.2966$, $y = 0.2983$, 计算其可由色度量为 $R = 0.7325$, $G = 0.9249$, $B = 1.2195$ 的原色光 (R)-($\lambda_R = 700$ nm), (G)-($\lambda_G = 546.1$ nm), (B)-($\lambda_B = 435.8$ nm) 混合而成^[19]. 单束平面波复振幅^[20]、一维矩形位相光栅的复振幅透过率^[20]、菲涅尔衍射区传递函数^[21]的表达式分别如 (1), (2), (3) 式所示. 联立 (1), (2), (3) 三个表达式, 利用卷积定理, 可计算得单色细平行光束经矩形位相光栅衍射后的频谱复振幅如 (4) 式所示.

$$U_0(x_0, y_0) = A \exp[j2\pi(f_\alpha x_0 + f_\beta y_0)], \quad (1)$$

$$t(x_0, y_0) = \left[(e^{j\phi_2} - e^{j\phi_1}) \text{rect}\left(\frac{x_0}{a}\right) \times \frac{1}{d} \text{comb}\left(\frac{x_0}{d}\right) + e^{j\phi_1} \right] \times \text{rect}\left(\frac{x_0}{W}\right) \text{rect}\left(\frac{y_0}{L}\right), \quad (2)$$

$$H(f_x, f_y) = \exp(jkz) \exp[-j\pi\lambda z(f_x^2 + f_y^2)], \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 U(f_x, f_y) &= F\{U_0(x_0, y_0)\} * F\{t(x_0, y_0)\} \cdot H(f_x, f_y) \\
 &= \left\{ (e^{j\phi_2} - e^{j\phi_1}) \frac{aAWL}{d} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \text{sinc}\left(\frac{an}{d}\right) \text{sinc}\left[W\left(f_x - \frac{n}{d} - f_\alpha\right)\right] \text{sinc}\left[L(f_y - f_\beta)\right] \right. \\
 &\quad \left. + e^{j\phi_1} AWL \text{sinc}\left[W(f_x - f_\alpha)\right] \text{sinc}\left[L(f_y - f_\beta)\right] \right\} \times \exp(jkz) \exp[-j\pi\lambda z(f_x^2 + f_y^2)], \tag{4}
 \end{aligned}$$

其中, $f_\alpha = \cos\alpha/\lambda$, $f_\beta = \cos\beta/\lambda$, α, β 分别为入射细平行光束与 x 轴、 y 轴的夹角; $f_x = x/(\lambda z)$, $f_y = y/(\lambda z)$ 分别是观察平面的频谱坐标; A 为入射细平行光束的振幅; ϕ_1, ϕ_2 分别为矩形位相光栅每个周

期内的两部分位相延迟; W, L 分别是衍射孔径的宽和长. 在本文中, $\beta = 90^\circ$, A 的取值由三原色光色度量 (R, G, B) 和 LED 朗伯光源出光角 (即 $90^\circ - \alpha$) 决定, $W = \Delta l$.

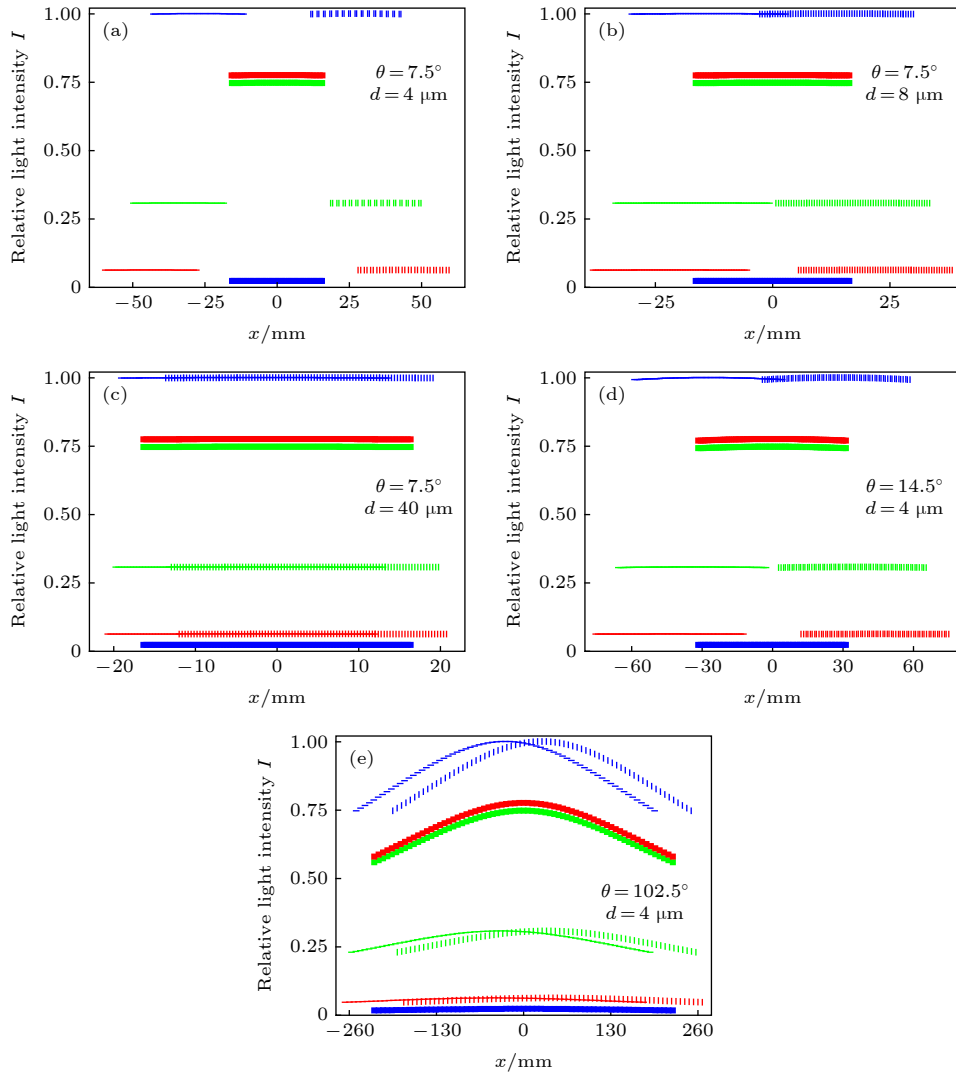


图 2 零级、 ± 1 级三衍射次的相对光强分布 (a)–(e) 入射光束锥角 θ 和光栅周期 d 分别分别为 $(7.5^\circ, 4 \mu\text{m})$, $(7.5^\circ, 8 \mu\text{m})$, $(7.5^\circ, 40 \mu\text{m})$, $(14.5^\circ, 4 \mu\text{m})$, $(102.5^\circ, 4 \mu\text{m})$; 图中红色、绿色、蓝色线分别代表三原色的红光、绿光、蓝光; 零级、+1 级、-1 级分别用粗横线、竖短线、细横线表示

Fig. 2. Relative light intensity distributions of zero, positive and negative one order of diffraction beams of three primary colors, where the RPG period d and the cone angle of incident beam θ of (a)–(e) are $(7.5^\circ, 4 \mu\text{m})$, $(7.5^\circ, 8 \mu\text{m})$, $(7.5^\circ, 40 \mu\text{m})$, $(14.5^\circ, 4 \mu\text{m})$ and $(102.5^\circ, 4 \mu\text{m})$ respectively. The red, green, blue line represents the red, green, blue light of three primary colors respectively. The zero, positive and negative one order beam is represented by the thick horizontal, vertical short and thin horizontal line respectively.

由(4)式可知,一维矩形位相光栅将入射光调制成 $2|n|+1$ 束光输出,可依次推导出细平行光束的各级衍射光的峰值位置 x_n 、各级次光强的半高全宽 Δx 、观察平面上零级 ($n=0$) 光束的能量计算表达式、第 n 能级光束的能量计算表达式分别如(5)—(8)式所示:

$$x_n = (n\lambda z/d) + z \cdot \cos \alpha, \quad (5)$$

$$\Delta x = 0.886\lambda z/W, \quad (6)$$

$$E_{n=0} = \left[(a/d)^2 + (1-a/d)^2 + 2(a/d)(1-a/d) \times \cos(\phi_2 - \phi_1) \right] A^2WL, \quad (7)$$

$$E_n = 2[1 - \cos(\phi_2 - \phi_1)] (a/d)^2 \sin^2(an/d) A^2WL. \quad (8)$$

最后,结合上述LED光源两方面的简化分解,联立观察平面衍射光场的频谱复振幅分布公式(4)、各级衍射光的峰值位置 x_n 计算式(5)、各级次光强的半高全宽 Δx 计算式(6)、各级衍射光束能量计算式(7)和(8),即可综合求解得LED宽带光源经矩形位相光栅衍射后观察平面上的三原色光的零级、 ± 1 级的相对衍射光强分布.

假定,矩形位相光栅的占空比 $r = a/d = 0.5$,槽深 $\Delta h = 1 \mu\text{m}$,材料的折射率为1.5,观察距离 z 为明视距离250 mm.当LED入射光束锥角 θ 和矩形位相光栅周期 d 分别为 $(7.5^\circ, 4 \mu\text{m})$, $(7.5^\circ, 8 \mu\text{m})$, $(7.5^\circ, 40 \mu\text{m})$, $(14.5^\circ, 4 \mu\text{m})$, $(102.5^\circ, 4 \mu\text{m})$ 时,计算求得零级、 ± 1 级三衍射级次相对光强 I 分布,如图2所示.

由图2可知,当LED入射光束锥角 θ 、矩形位相光栅周期 d 都比较小时,三原色衍射光束明显展开,衍射光谱的色散明显;其中红光展宽最明显.由图2(a)—(c)可知,随着矩形位相光栅周期 d 的增大,衍射光谱的色散减弱,三原色光的 ± 1 级衍射光束由最初的完全分开变成开始交叠、最终几乎完全交叠;由图2(a)、图2(d)、图2(e)可知,随着LED入射光束锥角 θ 增大,衍射光谱的色散减弱,三原色光的 ± 1 级衍射光束由最初的完全分开变成开始交叠、最终几乎完全交叠.

2.3 色散量 C 定义

为了便于理论分析及后续的实验测试,本文提出色散量 C 这一参量对衍射光谱的色散进行讨论.色散量 C 的定义如(9)式所示,其中, Δx_r 表示 ± 1

级的红光束远心端点和零级光束中点的距离,零级光束宽度 Δx_0 表示蓝、绿、红光的零级光束宽度的平均值,相关参量的示意图如图3所示.由图3可知, $\Delta x_r/\Delta x_0$ 的最小值等于0.5,为了使得衍射光谱无色散时对应的色散量 C 也恰好为0,因此,色散量 C 的定义式中减去一个常数0.5.

$$C = (\Delta x_r/\Delta x_0) - 0.5. \quad (9)$$

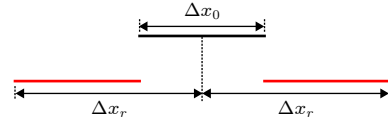


图3 色散量 C 的相关定参量示意图,其中红线、黑线分别代表红色光束、零级光束

Fig. 3. Relevant parameters of the dispersion parameter C . Where the red, black line respectively represents the red, zero order light beam.

由(9)式可知,色散量 C 无量纲, $C \geq 0$.当 C 数值越大,表明衍射光束的色散越明显;数值越小,则表明衍射光束的色散越小.当蓝、绿、红三原色光的 ± 1 级衍射光束完全交叠,全部成为零级光,此时为无色散的理想状态,即色散量 C 为最小值(0).当 $C = 0.5$ 时,红光 ± 1 级衍射光刚开始交叠; C 越小, ± 1 级衍射光交叠得越多;当 $C < 0.3$ 时,表明衍射光谱色散已比较小.因此,在设计宽带无色散器件的过程中,就是要通过改变结构参数或光照条件使得色散量 C 尽可能地小;初步设定色散量 $C = 0.3$ 为零色散的边界点.

根据理论模型及色散量 C 的定义,首先探讨LED入射光束锥角 $\theta = 7.5^\circ, 14.5^\circ, 102.5^\circ$ 时,矩形位相光栅周期 d 对色散量 C 的影响;然后探讨光栅周期 $d = 4, 8, 40 \mu\text{m}$ 时,LED入射光束锥角 θ 对色散量 C 的影响.计算所得的关系曲线如图4所示.

由图4可以看出,白光LED光束经矩形位相光栅衍射后的色散量 C 随着入射光束锥角 θ 和光栅周期 d 的增大而快速单调递减.由图4(a)中的红圆圈可知,当LED入射光束锥角 θ 分别为 $7.5^\circ, 14.5^\circ, 102.5^\circ$, 光栅周期 d 对应为 $20, 10, 2 \mu\text{m}$ 时,色散量 C 都已经小于0.3,衍射光谱色散已不明显,即有零色散的边界点 (θ, d) : $(7.5^\circ, 20 \mu\text{m})$, $(14.5^\circ, 10 \mu\text{m})$, $(102.5^\circ, 2 \mu\text{m})$.由图4(b)中的红圆圈可知,当光栅周期 d 分别为 $4, 8, 40 \mu\text{m}$, LED入射光束锥角 θ 对应为 $33.1^\circ, 17.9^\circ, 5.2^\circ$ 时,色散量

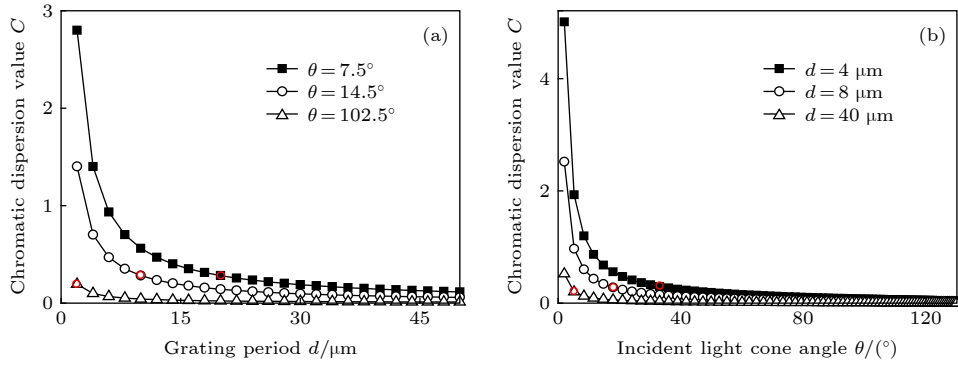


图4 色散量 C 与矩形位相光栅周期 d , LED 入射光束锥角 θ 的关系 (a) 矩形位相光栅周期 d ; (b) LED 入射光束锥角 θ ; 其中红圆圈表示零色散的边界点

Fig. 4. Influences of grating period d and incident light cone angle θ on the dispersion parameter C . (a), (b) is the calculated relationship curve between C and d , or θ respectively, where the red circles represent the zero-dispersion boundary points.

C 都已经小于 0.3, 衍射光谱色散已不明显, 即有零色散的边界点 (θ, d) : $(33.1^\circ, 4 \mu\text{m})$, $(17.9^\circ, 8 \mu\text{m})$, $(5.2^\circ, 40 \mu\text{m})$. 因此, 无论是增大入射光束锥角 θ 还是光栅周期 d , 只要这两参数匹配使得色散量 C 小于 0.3, 即可实现出射光束零色散.

2.4 物理机理

上述物理模型 (宽带光源微光学元件衍射理论模型) 中, 对衍射光谱的色散量 C 起主要影响的物理参量是入射光束锥角 θ 和微结构阵列周期 d . 增大入射光束锥角 θ 意味着降低入射光束的空间相干性, 衍射光谱色散变弱; 增大微结构阵列周期 d , 衍射光束色散度自然降低. 无论是增大入射光束锥角 θ 还是微结构阵列周期 d , 使得 ± 1 级衍射红光完全重叠 (即 $C = 0$), 如图 2(e) 所示, 则衍射光束全部为零级白光, 实现了无色散.

传统的色散概念, 如角色散率、线色散率, 是用来表示光束经折射或衍射后的角度、位移变化随波长变化的关系, 当物理模型有解析表达式时可求得角色散率、线色散率等; 本文定义的色散量 C 更适用于宽带光源难以存在精确解析表达式的物理模型, 其不仅计算过程简单、无需求导, 而且可通过实验结果直接验证.

3 实验验证与分析

本文应用微纳加工技术制作一款光栅周期 $d = 4 \mu\text{m}$ 、占空比为 0.5、光栅槽深为 $1 \mu\text{m}$ 的矩形位相光栅样品, 用来搭建图 1 所示的宽带光源微光学元件衍射理论模型, 进而测试验证上述理论分

析结果的正确性.

样品的制作工艺步骤主要包括光刻、湿法蚀刻、电铸、紫外线压印. 在 SiO_2 衬底上采用电子束曝光方法将所设计的矩形光栅图案制作成掩膜版, 再通过紫外曝光光致抗蚀剂的方法将掩膜版上的二元精细图文转移至光刻胶版上, 这时光强度为 $450 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, 曝光时间为 65 s. 然后用浓度为 $0.01 \text{ g}/\text{mL}$ 的 NaOH 溶液作为显影液, 显影 4 s. 然后将光刻胶版表面的浮雕光栅进行表面金属化, 形成金属导电层, 为在后续的电铸过程中作为阴极使用. 本文应用银镜反应原理在矩形光栅的光刻胶版上镀一层银, 用银氨络合物和葡萄糖溶液浸泡光刻胶版的同时并摇匀, 使得光栅表面附着一层薄薄的银层. 接着运用电铸工艺将金属层加厚至数十微米后剥离, 用碱液将残留在金属版上的光刻胶清洗干净, 得到了金属版的矩形光栅. 最后, 在金属版的矩形光栅制备好之后, 采用紫外线压印工艺方法复制转印出所需的矩形位相光栅样品, 所采用的 UV 胶折射率为 1.5.

运用激光显微镜测试样品, 所得的结构如图 5 所示; 从测试结果可知, 矩形位相光栅样品的实际结构参数与设计值一致.

运用单个白光 LED (色品坐标 $x = 0.2966$, $y = 0.2983$; 线宽 $l = 2.5 \text{ mm}$) 制作的矩形位相光栅样品、BM-7 亮度计等搭建测试装置, 用来测试分析矩形位相光栅的光谱色度值.

首先, 移开光栅, 直接用亮度计在观测平面测量白光 LED 光源中心点的亮度值、色坐标, 分别为 $8311.8 \text{ cd}/\text{m}^2$ 和 $x = 0.2919$, $y = 0.2735$. 接着, 使 LED 光束透过光栅, 改变 LED 光源和矩形位

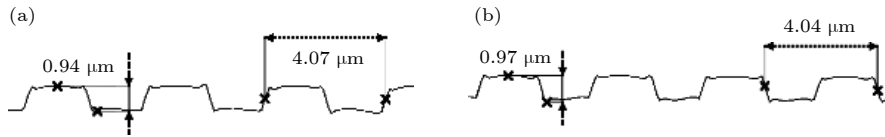


图 5 矩形光栅样品的结构测试图 (a) 光刻显影后; (b) 紫外线压印后

Fig. 5. Structural testing diagrams of the RPG sample: (a) After being developed; (b) the structural testing diagrams of the final sample after UV stamping.

表 1 不同入射光束锥角 θ 在观察平面中点所对应的衍射光谱的亮度值和色坐标

Table 1. Luminance and chromaticity coordinate of the center diffraction spectrum with different θ .

θ	102.68°	64.01°	45.24°	34.71°
Luminance L (cd/m ²)	6105.6	5161.2	4018.2	3262.1
Chromaticity Coordinate	$x = 0.2978y = 0.2828$	$x = 0.3024y = 0.2798$	$x = 0.3074y = 0.2779$	$x = 0.3025y = 0.2770$

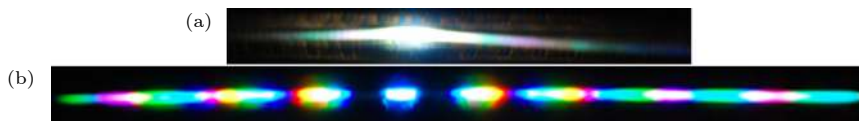


图 6 实验光束观测图 (a) 零色散边界点 ($\theta = 34.71^\circ, d = 4 \mu\text{m}$); (b) $\theta = 3.58^\circ, d = 4 \mu\text{m}$

Fig. 6. Observation diagram of the diffraction beam: (a) At zero-dispersion boundary point ($\theta = 34.71^\circ, d = 4 \mu\text{m}$); (b) $\theta = 3.58^\circ, d = 4 \mu\text{m}$.

相光栅间的距离 D , 即改变入射光束锥角 θ , 用人眼在观测平面观察实验光束的变化, 同时用亮度计测量观察平面上光束中点的亮度值、色坐标; 进而判断衍射光束的色散情况. 表 1 是不同入射光束锥角 θ 所对应的衍射光束中点的亮度值和色坐标的测试值.

在实验过程中, 用人眼可观察到, 随着入射光束锥角 θ 逐渐减小, 在观测平面观察到的实验光束则逐渐由白光变为彩虹光束, 即由无色散变成有色散. 当入射光束锥角 $\theta > 34.71^\circ$ 时, 衍射光束为白光, 衍射光谱几乎无色散; 从表 1 的色坐标测试值也可得到验证. 当入射光束锥角 $\theta = 34.71^\circ$ 时, 人眼已经在光束边缘处观测到彩虹光, 如图 6(a) 所示, 即衍射光束由零色散变成有色散; 而表 1 亮度计测试的色坐标仍位于白光区域, 是由于人眼对于色散的辨识度比亮度计更加精准. 这与上述理论分析的零色散边界点 ($\theta = 33.1^\circ, d = 4 \mu\text{m}$) 吻合, 进一步表明理论分析中设定色散量 $C = 0.3$ 为零色散的边界点是可行的.

为了验证色散量 C 定义的正确性, 本文将色散量 C 的测试结果与理论结果进行对比分析. 因为只有入射光束锥角 θ 足够小时, 色散才明显, 才能观察到 ± 1 级衍射的红光; 所以选取一些小的人射光束锥角 θ 来测试色散量 C ; 此处也是通过改

变 LED 光源至矩形位相光栅的距离 D 来改变入射光束锥角 θ . 如当入射光束锥角 $\theta = 3.58^\circ$ 时, 观察平面上的光束分布如图 6(b) 所示, 衍射光谱具有明显的彩虹色, 色散度高; 中心点色坐标为 $x = 0.2453, y = 0.1679$, 明显偏离白光. 接着, 根据 (2) 式对实际测量值进行计算, 得到色散量 C 的实验测试计算值. 将色散量 C 的实验测试计算值与理论计算值进行对比, 如图 7 所示.

从图 7 中可以看出, 色散量 C 的实际测试值与理论计算值非常接近, 绝对误差小于 0.1, 相对

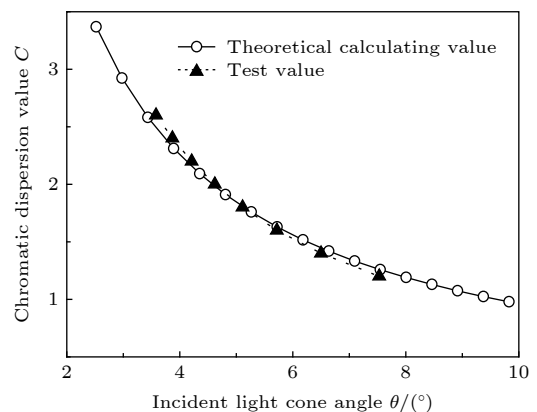


图 7 色散量 C 的理论值和测试值与入射光束锥角 θ 关系曲线的对比

Fig. 7. Contrast curves of the relationship between the test and theoretical value of C with θ .

误差百分比小于 3.3%. 该误差有可能是因为理论计算模型的量化取值、操作人眼的观察光束的误差而引起的, 故该误差在可接受范围内. 实验结果表明, 本文定义的色散量 C 不仅可以较准确定量地衡量宽光谱光束经矩形位相光栅衍射后的色散程度, 而且其具体数值可通过理论计算、或是实验直接快速测得.

4 结 论

基于宽带光源下微光学元件 (如集成导光板) 在衍射色散方面的设计需求, 本文以矩形位相光栅、白光 LED 为例, 构建了宽带光源微光学元件衍射的理论分析模型, 探讨分析了衍射光谱的色度特性, 提出了能准确定量衡量衍射光束色散程度的色散量 C , 并明确给出了零色散的边界判据点 $C = 0.3$. 探究发现白光 LED 光束经矩形位相光栅衍射后的色散量 C 随着入射光束锥角 θ 和光栅周期 d 的增大而快速减小; 无论是增大入射光束锥角 θ 还是光栅周期 d , 只要两参数匹配使得色散量 $C \leq 0.3$ 即可实现出射光束零色散, 给出了物理机理分析. 同时还应用微纳加工技术制作了结构参数与设计值相一致的矩形位相光栅, 测试了不同入射光束锥角 θ 下的衍射光场的亮度值、色坐标, 进而计算得到相应的色散量 C ; 实验结果与理论分析结论一致, 表明本文提出的色散度判据参量 C 以及零色散边界点的正确性. 上述研究成果, 不仅为本课题组研究设计的集成导光板提供指导, 而且也能为其他宽带衍射元件设计过程中探讨色散特性时提供指引.

参考文献

- [1] Xu P, Huang H X, Wang K, Ruan S C, Yang J, Wan L L, Chen X X, Liu J Y 2007 *Opt. Express* **15** 809
- [2] Xu P, Hong C Q, Cheng G X, Zhou L, Sun Z L 2015 *Opt. Express* **23** 6773
- [3] Huang H X, Ruan S C, Yang T, Xu P 2015 *Nano-Micro Lett.* **7** 177
- [4] Huang H X, Xu P, Ruan S C, Yang T, Yuan X, Huang Y Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 154212 (in Chinese) [黄海漩, 徐平, 阮双琛, 杨拓, 袁霞, 黄燕燕 2015 物理学报 **64** 154212]
- [5] Xu P, Yuan X, Yang T, Huang H X, Tang S T, Huang Y Y, Xiao Y F, Peng W D 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 124201 (in Chinese) [徐平, 袁霞, 杨拓, 黄海漩, 唐少拓, 黄燕燕, 肖钰斐, 彭文达 2017 物理学报 **66** 124201]
- [6] Xu P, Tang S T, Yuan X, Huang H X, Yang T, Luo T Z, Yu J 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 024202 (in Chinese) [徐平, 唐少拓, 袁霞, 黄海漩, 杨拓, 罗统政, 喻珺 2018 物理学报 **67** 024202]
- [7] Thomschke M, Reineke S, Lüssem B, Leo K 2012 *Nano Lett.* **12** 424
- [8] Siitonen S, Laakkonen P, Vahimaa P, Kuittinen M, Tossavainen N 2006 *Appl. Opt.* **45** 2623
- [9] Zhao X N, Hu J P, Lin Y, Xu F, Zhu X J, Pu D L, Chen L S, Wang C H 2016 *Sci. Rep.* **6** 28319
- [10] Xue C X, Cui Q F 2010 *Opt. Lett.* **35** 986
- [11] Tsukamoto H, Nishiyama M 2006 *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** 6678
- [12] Xu P, Huang Y Y, Zhang X L, Huang J F, Li B B, Ye E, Duan S F, Su Z J 2013 *Opt. Express* **21** 20159
- [13] Xu P, Huang Y Y, Su Z J, Zhang X L, Luo T Z, Peng W D 2015 *Opt. Express* **23** 4887
- [14] Xu P, Yan Z L, Wan L L, Huang H X 2004 *Proceedings of SPIE Holography Diffractive Optics and Applications II* Beijing, China, November 8–11, 2004 p66
- [15] Park S R, Kwon O J, Shin D, Song S H, Lee H S, Choi H Y 2007 *Opt. Express* **15** 2888
- [16] Yang X P, Yan Y B, Jin G F 2005 *Opt. Express* **13** 8349
- [17] Caputo R, Sio L D, Jak M J J, Hornix E J, Boer D K G, Cornelissen H J 2007 *Opt. Express* **15** 10540
- [18] Xu M, Urbach H P, Boer D K G 2007 *Opt. Express* **15** 5789
- [19] Zhang Y M 2008 *Applied Optics* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) Chapter 7 (in Chinese) [张以谟 2008 应用光学 (北京:电子工业出版社) 第7章]
- [20] Lü N G 2006 *Fourier Optics* (Beijing: China Machine Press) pp70–113 (in Chinese) [吕乃光 2006 傅里叶光学 (北京:机械工业出版社)第70—113页]
- [21] Su X Y, Li J T 1999 *Information Optics* (Beijing: Science Press) p44 (in Chinese) [苏显渝, 李继陶 1999 信息光学 (北京:科学出版社) 第44页]

Non-dispersion boundary conditions of micro-optical element illuminated by broadband light source^{*}

Huang Yan-Yan[#] Zhang Xu-Lin[#] Yang Wei Wang Xiao-Bing
Lei Lei Peng Wen-Da Xu Ping[†]

(College of Physics and Optoelectronic Engineering, Institute of Micro-Nano Photoelectronic

Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

(Received 10 May 2019; revised manuscript received 2 August 2019)

Abstract

With the development of the microstructure fabrication process and the integration of micro-optical elements, diffractive micro-optical elements are widely used in broadband light sources, such as the integrated light guide plate (ILGP). And with the structural feature size of the ILGP decreasing from tens of microns to microns and even sub-microns, the diffraction dispersion phenomenon will inevitably become a prominent problem in research and design of non-dispersion elements. Nevertheless, under the broadband light source illumination, the analysis of the dispersion characteristic of diffraction spectrum of the microstructure array has not been reported in detail. Therefore a theoretical model of micro-optical element with a typical one-dimensional rectangular phase grating (RPG) and a widely used white LED source is established in this paper. The dispersion characteristic of the diffraction spectrum is studied, that is, with the increase of period of the RPG or the cone angle of incident beam, the dispersion of diffraction spectrum weakens. Dispersion parameter C and its formula are proposed, which can precisely measure the chromatic dispersion degree of the diffraction spectrum. Furthermore, the boundary criterion point of non-dispersion $C = 0.3$ is given explicitly. It is explored that no matter whether the cone angle of incident beam or the RPG period increases, the non-dispersion output light can be obtained only by matching the two parameters to make the dispersion parameter C less than 0.3. Then an RPG sample, of which the structural parameters are consistent with the designed ones, is fabricated by using micro-nano processing technology. By changing the cone angle of incident beam, the luminance and the chromaticity coordinates of the diffraction beam are tested. The analyses of the test results of the fabricated RPG sample show that the spectrum dispersion regularity is in accord with the theoretical analysis. The consistency verifies the correctness of dispersion parameter C , its formula and the non-dispersion boundary criterion point. The dispersion parameter C and non-dispersion boundary criterion point presented in this paper provide a guidance for analyzing the dispersion characteristics when the structural parameters of the integrated light guide plate and other broadband micro-optical element are designed.

Keywords: micro-optical element, broadband light source, non-dispersion, integrated light guide plate

PACS: 42.79.-e, 42.25.Fx, 46.40.Cd

DOI: 10.7498/aps.68.20190716

^{*} Project supported by National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61275167), and Shenzhen Science and Technology Development Funds (Grant Nos. JCYJ20180305125430954, JCYJ20140418095735591, JCYJ20130329103020637).

[#] These authors contributed equally.

[†] Corresponding author. E-mail: xuping@szu.edu.cn