

# 光学学报

## 基于平面光波导的二维色散系统

贾生萍, 卢顺, 谭中伟\*

北京交通大学电子信息工程学院光波技术研究所, 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044

**摘要** 随着光谱检测的重要性与日俱增, 对高性能光谱仪的研究显得尤为重要和紧迫。提出一种基于平面光波导的二维光谱色散系统, 它集合了平面波导微型化和光栅高色散的优点, 能够将光谱在二维平面上展开。通过仿真发现, 所提系统能够实现光谱在二维方向上展开, 带宽远远大于基于虚像相位阵列(VIPA)的二维色散系统。此外, 所提系统的体积较小, 更易于集成。

**关键词** 衍射; 二维光谱检测; 平面光波导; 体光栅; 光谱检测

**中图分类号** O436 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS230588

### 1 引言

随着计算机技术的发展, 微型光谱仪因其结构紧凑且具有可集成性被广泛研究, 其不仅在分子检测<sup>[1]</sup>、遥感<sup>[2]</sup>和原子谱检测<sup>[3]</sup>等领域有所应用, 还有望应用于医学<sup>[4]</sup>、刑侦、安全检测等领域<sup>[5]</sup>。2021年, Yang等<sup>[6]</sup>将微型光谱仪归纳为四大类: 色散型、窄带滤波型、傅里叶变换型和计算重建型。若要同时获得宽波长范围和高分辨率, 往往以牺牲系统的小尺寸为代价, 而大尺寸除了会带来成本的增加, 还会额外引入插入损耗, 与集成化的期望背道而驰。为此, 高分辨率、宽波长范围与小尺寸的集成化成为光谱仪的研究热点。

基于目前的成像技术, 以电荷耦合器件(CCD)为代表的电子成像设备得到了迅速发展<sup>[7]</sup>。将衍射光栅和 CCD 等成像设备相结合的无机械扫描装置的光谱仪不断涌现, 该光谱仪具有体积小、性能稳定、测试速度快等优点, 可实现高分辨率光谱检测。为充分利用 CCD 面阵的高分辨率特性, 光谱产生二维色散是必要条件。早期产生二维色散的方法主要是基于一对正交的光栅<sup>[8]</sup>, 或者是光栅与线阵的结合, 但它们普遍存在角色散小、分辨率低等问题。虚像相位阵列(VIPA)是一种新型色散器件, 其外形是一块双面镀膜的玻璃平板, 具有大色散的优点, 但也存在波长混叠和分辨率低等问题。2004年, Xiao等<sup>[9]</sup>为解决波长混叠问题, 将 VIPA 和衍射光栅相结合, 实现了二维色散。此后, 基于 VIPA 的二维光谱检测得到广泛的研究和应用: Fiore等<sup>[10]</sup>利用 VIPA 实现了布里渊光谱检测; 周昊

等<sup>[11]</sup>利用 VIPA 光谱仪完成了红光波段的光谱检测; Zhou等<sup>[12]</sup>开发了一种用于微激光检测的高分辨率光谱仪, 该光谱仪可实现 VIPA 标准具和正交方向光栅的级联光谱色散。但是 VIPA 对输入光束的质量要求严格, 体积较大的光束难以集成, 而且 VIPA 需要高反射率的多层介质膜, 因此其带宽也受到很大限制。目前, 国内在该领域的研究进展落后于国外, 由于技术垄断和工艺水平有限, 该领域的研究成本极高, 且良品率极低、精度差。

基于上述研究, 通过分析目前限制光谱仪微型化的问题, 结合现有的基于 VIPA 的二维光谱技术及增强现实(AR)中的平面波导技术<sup>[13]</sup>, 本文提出一种基于平面波导的二维色散系统。该系统与 VIPA 结构相似, 不仅继承了 VIPA 高分辨率和大色散的特性, 还利用平面波导的体光栅衍射特性, 解决了 VIPA 中存在的对入射光束要求高、多级衍射及损耗较大<sup>[14]</sup>等问题。最重要的是, 利用平面波导紧凑和轻薄的特性<sup>[15]</sup>, 有望进一步推进光谱检测结构的微型化, 同时在一定程度上降低了工艺制作的难度。

### 2 基本原理

#### 2.1 波导原理

所提系统结构如图 1 所示, 其中,  $w$  为光腰尺寸。待测光经透镜准直后, 以垂直于波导平面的方向入射到波导内, 在耦入体光栅的衍射和波导的全反射作用下, 在波导内进行传输, 到达耦出体光栅。由于耦入体光栅和耦出体光栅的结构具有对称性, 待测光垂直于波导平面射出。不同波长的待测光在耦入体光栅的衍

收稿日期: 2023-02-23; 修回日期: 2023-04-03; 录用日期: 2023-04-23; 网络首发日期: 2023-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(61827818, 61875008)、谷东科技有限公司资助项目

通信作者: \*zhwtan@bjtu.edu.cn

射作用下,在波导内以不同的传输角度,且保持各自不变的传播周期向前传播。传播周期不同导致不同波长的光到达耦出体光栅的位置不同,即在波导( $z$ 方向)

中被耦出的位置不同,从而达到在水平方向( $z$ 方向)上根据波长分离激光的效果。可见,在水平方向上不同波长激光的分离主要依靠衍射波导结构实现。

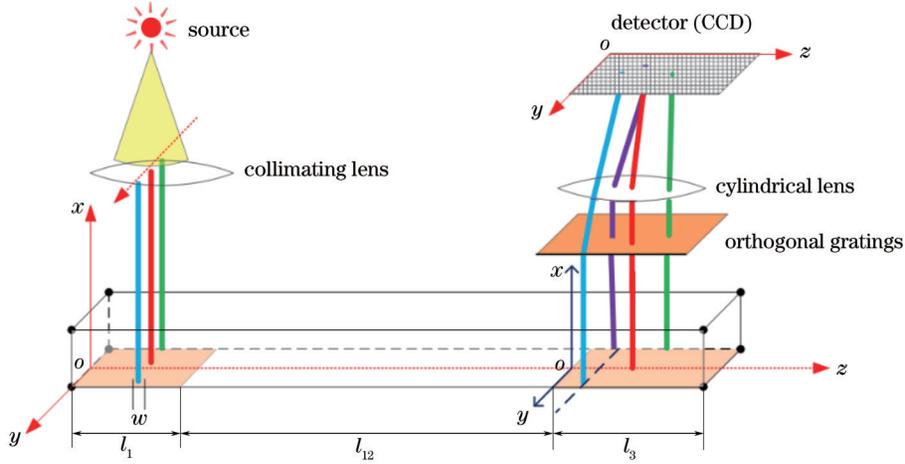


图 1 所提系统结构图

Fig. 1 Structure of proposed system

图 2 展示了水平方向( $z$ 方向)的不同波长光的分离原理,衍射波导由一块平面光波导及耦入、耦出元件组成,其中耦入和耦出部分都可以使用体光栅代替。体光栅自身存在角色散特性,使得相互平行的光在垂直射入体光栅后,不同波长的光以不同的角度衍射并在波导内传输;衍射角  $\theta_i$  由光栅方程给出,并且为了满足波导的全反射条件,衍射角需要大于临界角。继续推导可以得到不同波长的光在波导内部的传输周期

$T_i$ ,可表示为

$$\begin{cases} \Delta \sin \theta_i = m \lambda_i \\ \theta_i \geq \arcsin \left( \frac{n_1}{n_2} \right) \\ T_i = 2h \tan \theta_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\Delta$ 为光栅周期; $\theta_i$ 为衍射角; $m$ 为衍射级次; $\lambda_i$ 为入射光的波长; $h$ 为波导厚度; $n_1$ 为包层折射率; $n_2$ 为波导的材料折射率。

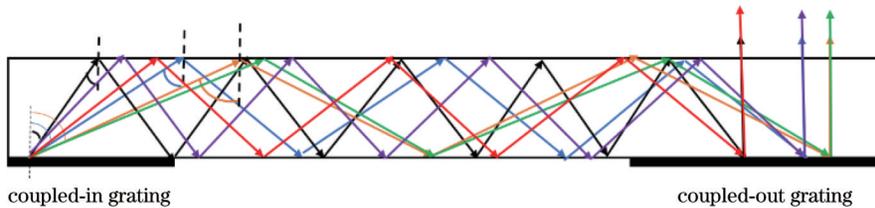


图 2 衍射波导的工作原理

Fig. 2 Principle of operation of diffraction waveguides

设波导结构的尺寸为  $l' = l_1 + l_{12}$ ,如图 1 所示,在耦出体光栅处建立坐标,令  $b = \text{mod} [l', T(\lambda_i)]$  (mod 表示取余操作),推导得到不同波长的光在耦出体光栅的位置,如式(2)所示,并在 MATLAB 软件中建立衍射波导结构,对不同波长光的耦出位置进行探究和分析,如图 3 所示。

$$z(\lambda_i) = \begin{cases} 0, & b = 0 \\ T(\lambda_i) - b, & b \neq 0 \end{cases} \quad (2)$$

由图 3 可知,不同波长的光到达耦出体光栅处的位置具有周期性,且随着波长增加,位置展开也越宽。以图 3 中波导厚度为 1 mm 的位置曲线为例,不同波长的光在耦出体光栅的位置有可能相同(如图 3 中的小圆圈),即在同一位置发生了波长混叠。为了解决波长

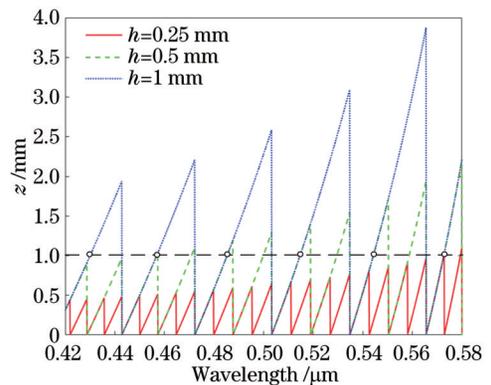


图 3 不同波长的出射光在耦出体光栅处的位置

Fig. 3 Position of output light with different wavelengths at coupled-out volume grating

混叠的问题,需要在衍射波导之后加一个元件进行二次色散,本实验选用体光栅,设计其衍射方向在  $xoy$  平面,在垂直方向( $y$ 方向)进一步分离波长混叠的光。

### 2.2 体光栅

结合  $k$  矢量理论<sup>[13]</sup>可知,光束的衍射特性主要与光栅周期有关。为使水平方向( $z$ 方向)的不同波长光

的分离仅与位置有关,耦合和耦合出体光栅均采用对称型周期结构<sup>[16]</sup>,如图 4 所示,其中  $k$  和  $k'$  分别为耦合和耦合出体光栅的光波矢量, $R$ 、 $S$  和  $R'$ 、 $S'$  为分别为耦合和耦合出体光栅的入射光和衍射光, $G$  为光栅矢量, $d$  为体光栅厚度, $\varphi$  和  $\varphi'$  分别为耦合和耦合出体光栅的倾角。

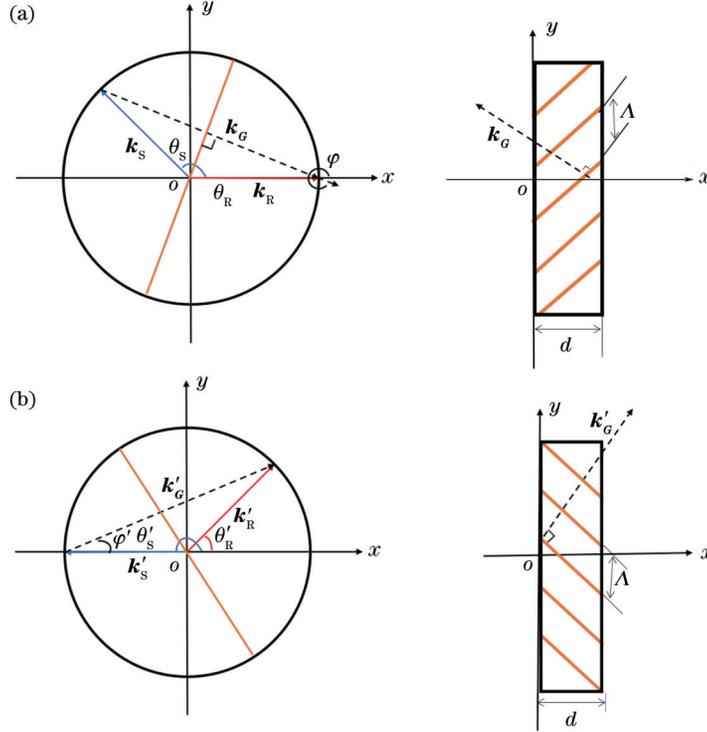


图 4 光栅设计原理。(a)耦合入体光栅结构;(b)耦合出体光栅结构

Fig. 4 Grating design principle. (a) Coupled-in volume grating structure; (b) coupled-out volume grating structure

为了使水平方向不同波长光的分离仅与位置有关,且能够满足全息波导光学系统对光束传播方向的要求,两个耦合体光栅的倾角<sup>[16]</sup>应满足

$$\varphi = -\varphi'. \quad (3)$$

图 4 所示的耦合和耦合出体光栅的光栅平面应为  $xoz$  平面;对于二次色散的体光栅,也称为正交光栅,其结构与耦合出体光栅相同,但其衍射方向与耦合出体光栅垂直,光栅平面为  $xoy$  平面。经过两次展开,不同波长的光经过正交光栅之后的角度各不相同,再经过柱透镜聚焦(仅在  $y$  方向进行)系统聚焦到探测器,将波长信息映射到位置信息,从而得到二维光谱。

### 2.3 二维色散

经过整个系统之后的不同波长的光在 CCD 探测器上的分布如图 5 所示,虽然体光栅具有波长选择性,但通过复合光栅<sup>[13]</sup>的方法,可以在较宽的波长范围内实现高效的衍射和传输,如图 6 所示,其中 TM 表示横磁波,TE 表示横电波。可以在 Zemax 软件中设置相关参数,使其只有 0、+1(或-1)的衍射级次,同时使所需方向的衍射效率达到 90% 以上。这样可以在最大限度上减小光栅衍射对光强的减弱作用,使不同波

长光的输出能够清晰显示。

基于上述分析,设柱透镜焦距为  $f$ ,可得到波长与位置的对应关系,即

$$\begin{cases} z(\lambda_i) = \begin{cases} 0, & b = 0 \\ T(\lambda_i) - b, & b \neq 0, \end{cases} \\ y(\lambda_i) = \tan(\theta'_i) \cdot f \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\theta'_i$  为正交光栅的衍射角。图 5(a) 所示为连续光源在 CCD 上的探测结果,图 5(b) 所示为离散光源的探测结果,其中,自由波长范围(FSR)为混叠的相邻波长点之间的距离, $dz$  为相邻波长点的位置间距, $d\lambda$  为相邻波长点之间的波长差。理论上,根据式(4)中位置与波长的对应关系,可以得到图 5(b) 所示的波长与位置的关系。如图 5(b) 所示,结合 FSR 的定义,取混叠的相邻波长点之间的距离为 FSR,分析经波导色散之后存在的波长混叠情况。取  $y$  向的一列,对相邻波长点之间的 FSR 取平均值,改变厚度,探究 FSR 与厚度的关系,结果如图 7 所示。随着波导的厚度增加,FSR 逐渐增大,在水平方向上可分离的波长范围也扩大,波长混叠现象减弱,以衍射波导色散为主;当厚度减小时,FSR 逐渐减小,波长混叠现象增强,以正交色散为主。

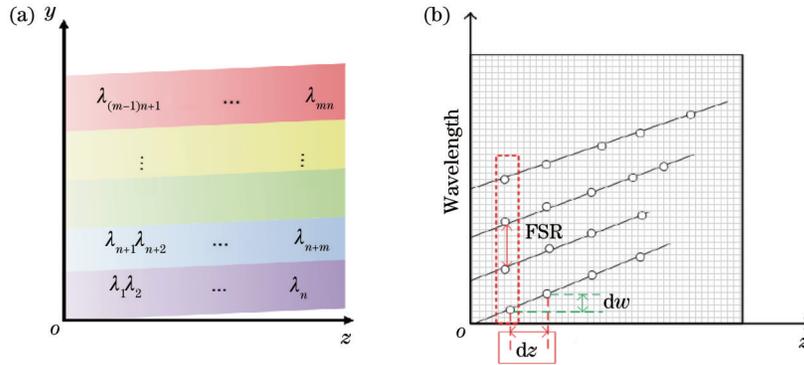


图 5 不同光源的光谱在检测器上的分布。(a)连续光源;(b)离散光源

Fig. 5 Distribution of the spectra on the detector from different light sources. (a) Continuous light source; (b) discrete light source

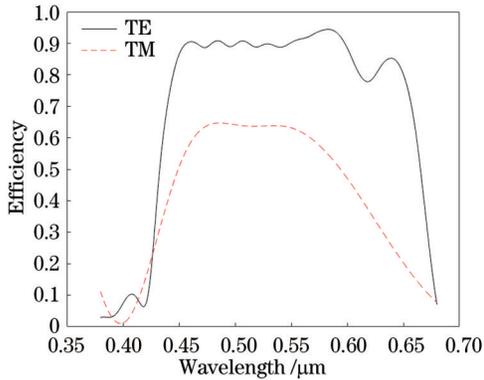


图 6 复合光栅的衍射效率

Fig. 6 Diffraction efficiency of composite grating

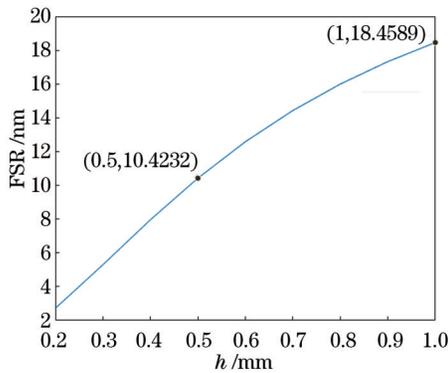


图 7 FSR与波导厚度h的关系

Fig. 7 Relationship between FSR and h

### 2.4 参数指标

对于一个光谱仪而言,波长范围和波长分辨率是衡量其性能的重要参数。波长范围主要是指光谱仪可测量的波长区间,在该结构中,波长范围主要与波导结构和折射率有关。最短的波长 $\lambda_{\min}$ 是衍射光栅的参考波长,最长的波长 $\lambda_{\max}$ 是传播路径 $l=l_1+l_{12}+l_2$ ,即耦合位置 $z(\lambda_i)=l_2$ 对应的波长,结合式(1)和波导的参数得出:

$$\begin{cases} \lambda_{\min} = \lambda_R \\ \lambda_{\max} = \Lambda \sin\left(\arctan \frac{l}{2h}\right) \\ \Delta\lambda = \lambda_{\max} - \lambda_{\min} \end{cases} \quad (5)$$

由上述分析可知,波长范围主要受限于全反射角以及波导结构。由于全反射角主要与波导的折射率有关,受材料的限制,通过改善全反射角来增大可测量波长范围是不现实的,故探究波导结构带来的影响。波长范围与波导的传播路径 $l$ 成正比,与波导的厚度 $h$ 成反比。同时,为了保证波段内的所有波长的光都能有效耦合,需要保证最大的传播周期小于耦合体光栅的长度。

波长分辨率是衡量光谱仪能够分辨波长能力的参数。由于本实验对二维光谱进行展开,故存在水平方向( $z$ 方向)和垂直方向( $y$ 方向)的光谱分辨率。水平方向的分辨率<sup>[17]</sup>主要与衍射波导的色散有关,在水平方向的输出位置也是角色散在波导内部的传播结果,主要与耦合和耦合体光栅的色散能力、波导结构有关。垂直方向的分辨率主要与正交光栅的角色散和柱透镜的焦距有关,但垂直方向的色散主要是为了扩展波长范围。如图5(b)所示, $z$ 方向和 $y$ 方向的分辨率分布定义为各自方向相邻点之间的距离与波长的比值。为使最后的显示分辨率更高,采用水平和垂直方向高像素的CCD面阵探测器,可获得超过普通微型光谱仪的光谱分辨率。

### 3 仿真与分析

在Zemax软件中,根据图1所示的结构搭建系统,所搭建的仿真系统如图8所示,仿真参数如表1所示。

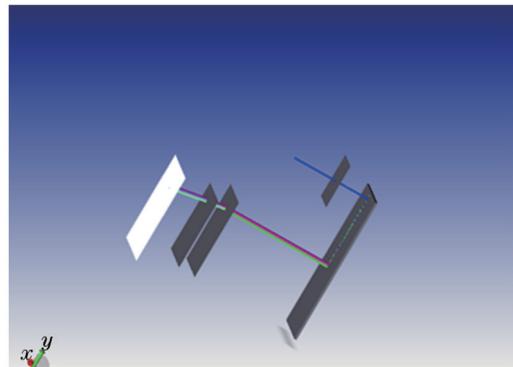


图 8 所搭建系统的仿真结构

Fig. 8 Simulate structure of proposed system

表 1 所使用的仿真参数  
Table 1 Parameters in the simulated structure

Item	Description
Source	400–500 nm, 500–560 nm, 620–780 nm, and visible band, random polarization
Wave guide	H-K9, $l_1=1$ mm; $l_{12}=14$ mm; $l_2=8, 16, 25$ mm; $h=0.5, 1, 3$ mm
Volume grating	Coupled-in grating: $n=1.54$ ; R: $(0^\circ, \lambda_R)$ , S: $(54^\circ, \lambda_R)$
Orthogonal grating	Coupled-out grating: $n=1.54$ ; R: $(54^\circ, \lambda_R)$ , S: $(0^\circ, \lambda_R)$ , $\lambda_R$ is the central wavelength of each band
Column lens	$n_0=1.54$ ; same as the coupled-in grating; rotate the diffraction direction by $90^\circ$
CCD resolution	$f_x=0$ mm, $f_y=10$ mm
CCD resolution	600 pixel $\times$ 600 pixel

### 3.1 单波段分析

如图 9 所示, 经过光线追迹仿真, 在待测光各波段设置 50 个离散波长点, 由于系统的效率主要取决于耦入和耦出体光栅的衍射效率, 经探究, 光源的偏振状态经过该系统后不会发生改变, 只是 TM 的偏振效率低于 TE 的偏振效率。由于随机偏振效率在 TM 偏振效率和 TE 偏振效率之间, 为了更好地模拟真实情况, 且

保持系统的简洁性, 本实验依旧使用随机偏振。利用 CCD 获得离散波长点的分布规律, 即波长信息与探测位置信息的对应关系。结合前面的理论分析以及得到的仿真结果, 可得到以下的结论: 1) 该系统可以实现不同波长激光的分离, 并且波长信息与 CCD 探测的位置一一对应。在探测器上的  $(z, y)$  坐标越大, 波长越大, 可见该系统可实现二维波长的展开, 验证了所提方

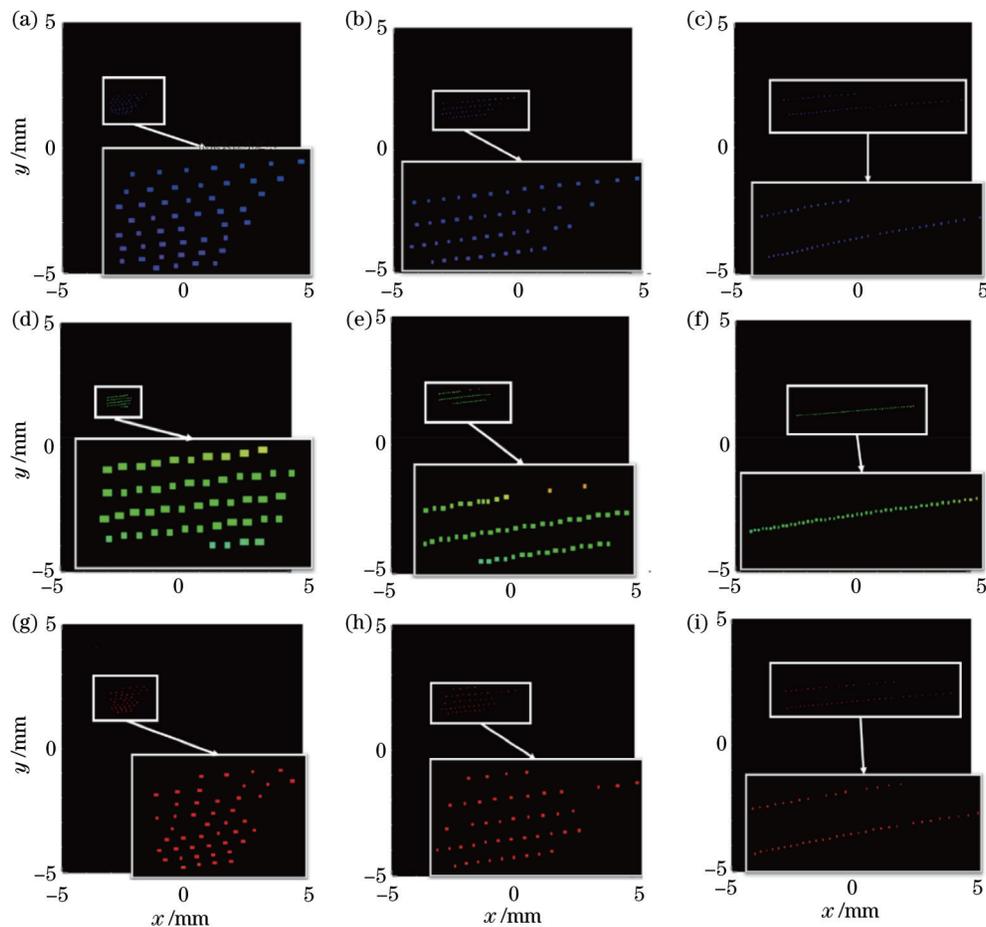


图 9 待测光各波段离散波长点仿真结果。(a) 蓝色波段,  $h=0.5$  mm; (b) 蓝色波段,  $h=1$  mm; (c) 蓝色波段,  $h=3$  mm; (d) 绿色波段,  $h=0.5$  mm; (e) 绿色波段,  $h=1$  mm; (f) 绿色波段,  $h=3$  mm; (g) 红色波段,  $h=0.5$  mm; (h) 红色波段,  $h=1$  mm; (i) 红色波段,  $h=3$  mm

Fig. 9 Simulation results of discrete wavelength points in each band to be measured. (a) Blue band,  $h=0.5$  mm; (b) blue band,  $h=1$  mm; (c) blue band,  $h=3$  mm; (d) green band,  $h=0.5$  mm; (e) green band,  $h=1$  mm; (f) green band,  $h=3$  mm; (g) red band,  $h=0.5$  mm; (h) red band,  $h=1$  mm; (i) red band,  $h=3$  mm

案的可行性。2) 波导厚度会影响波长的分布。当厚度较小时, 波长在  $z$  方向的聚集度高, 不同波长激光的分离主要以  $y$  方向的色散为主, 即厚度越小, 在可测得的波长范围内出现重叠的波长周期越多, 这是因为纵向的展开主要依靠正交光栅的色散, 以保留光栅大色散所带来的高分辨率; 当厚度较大时, 波长主要在  $z$  方向

### 3.2 可见光全波段分析

为探究系统的可测波长范围, 使用 380~680 nm 波段的光, 根据其在 CCD 探测器上 ( $z_{\max}$ ,  $y_{\max}$ ) 对应的波长, 以及可在波导内部全反射传输的最小波长, 得到在不同参数下系统可测量的波长范围, 如表 2 所示。光线追迹后探测器的测量结果如图 10 所示。由表 2 可知: 波导厚度与可测波长范围成反比; 由于全反射条件的限制, 厚度增加并不能有效扩大可测波长范围。该系统可实现 200 nm 左右的可测波长范围, 较目前的微型光谱仪有所提高。可测波长范围与耦出体光栅的长度成正比, 耦出体光栅越长, 落在耦出体光栅并耦出的光的最大波长会越大, 从而提高波长的可测范围。同

展开, 即重叠的波长周期数量减少, 其  $z$  方向的分辨率主要依赖于衍射波导, 并在耦出位置展开, 与波导结构有关。3) 当波导厚度到达某个值后,  $y$  方向的色散展开可能会消失。同波长范围的光只在  $z$  方向展开, 即不存在波长混叠, 也无法进行二维展开。

样地, 受全反射角的限制, 耦出体光栅的长度增加, 只能增大耦出概率, 并不能有效地扩大波长的可测范围。从图 10 可以看到, 有些波长并非连续排列, 即出现波长点缺失, 尤其是在长波长波段, 主要原因是: 1) 为避免波长信息丢失, 须保证波段内所有波长的光能够有效耦出, 但由于光源为不同波长的光随机分配能量, 以及在仿真过程中光源设置为随机偏振, 即同时存在 TE 和 TM 模。从上述分析可知, 系统体光栅对 TM 的衍射效率低于对 TE 的衍射效率, 在耦入、耦出体光栅和正交光栅的衍射作用的叠加下, TM 的衍射效率更低, 最终有些波长点由于能量过低而无法显示。2) 仿真中一部分光线受到几何路径的限制。根据波长的分

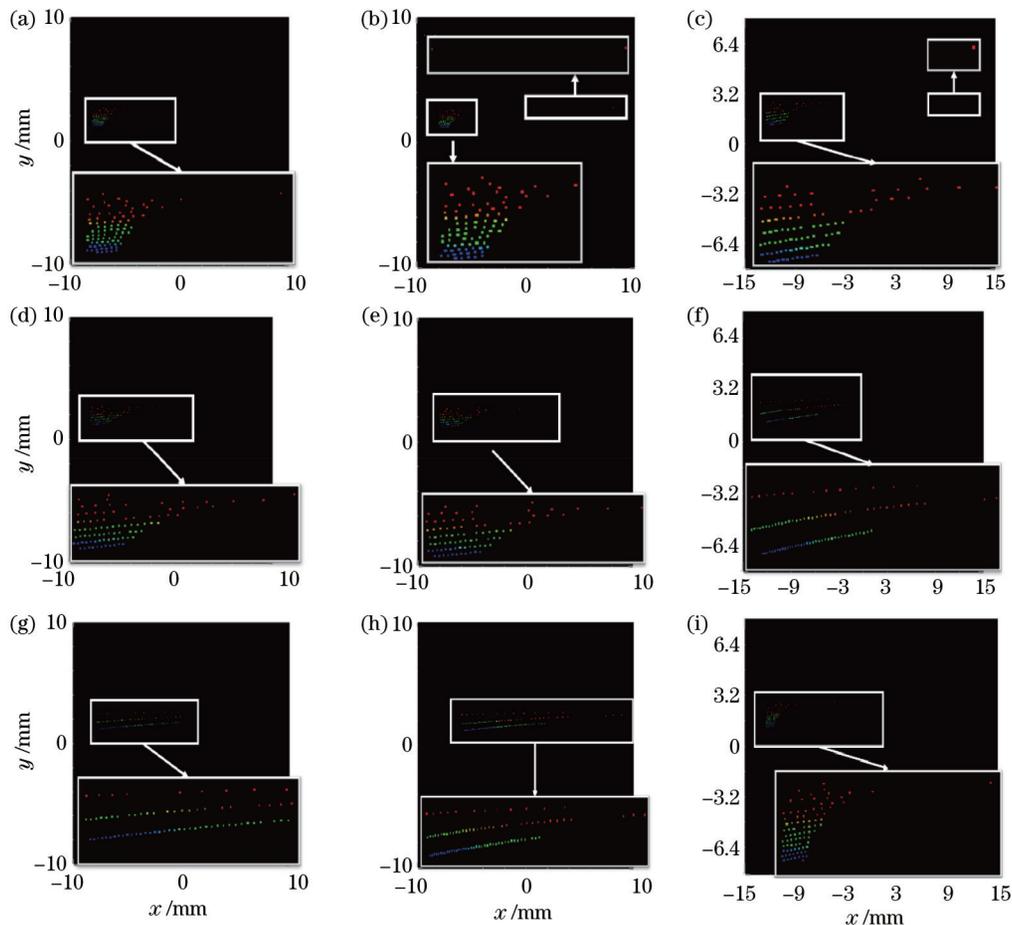


图 10 在宽波段范围内离散波长点的仿真结果。(a)  $h=0.5$  mm,  $L_2=8$  mm; (b)  $h=0.5$  mm,  $L_2=16$  mm; (c)  $h=0.5$  mm,  $L_2=25$  mm; (d)  $h=1$  mm,  $L_2=8$  mm; (e)  $h=1$  mm,  $L_2=16$  mm; (f)  $h=1$  mm,  $L_2=25$  mm; (g)  $h=3$  mm,  $L_2=8$  mm; (h)  $h=3$  mm,  $L_2=16$  mm; (i)  $h=3$  mm,  $L_2=25$  mm

Fig. 10 Simulation results of discrete wavelength points in a wide band range. (a)  $h=0.5$  mm,  $L_2=8$  mm; (b)  $h=0.5$  mm,  $L_2=16$  mm; (c)  $h=0.5$  mm,  $L_2=25$  mm; (d)  $h=1$  mm,  $L_2=8$  mm; (e)  $h=1$  mm,  $L_2=16$  mm; (f)  $h=1$  mm,  $L_2=25$  mm; (g)  $h=3$  mm,  $L_2=8$  mm; (h)  $h=3$  mm,  $L_2=16$  mm; (i)  $h=3$  mm,  $L_2=25$  mm

布规律,可找回缺失的波长信息,因此不会影响最终的波长分布规律和测量结果。

表 2 各参数下的波长范围  
Table 2 Wavelength range for each parameter

$L_2 /$ mm	Wavelength range / $\mu\text{m}$		
	$h=0.5$ mm	$h=1$ mm	$h=3$ mm
8	0.45-0.676340	0.45-0.674530	0.45-0.656100
16	0.45-0.676604	0.45-0.675599	0.45-0.664900
25	0.45-0.676738	0.45-0.676127	0.45-0.669730

## 4 结 论

搭建了基于平面光波导结构的二维色散系统,相较于镀膜型系统,所搭建系统扩大了可测波长范围,如现有的基于 VIPA(比如 Hyperfine 超精细光谱仪)的光谱仪测试带宽一般只有 50 nm 左右,最多达到 100 nm,无法满足很多领域的应用需求,但所搭建系统的测试带宽可超过 200 nm。与 VIPA 相比,所搭建系统利用平面波导的全反射特性与耦入体光栅的衍射特性,降低了对输入光束的要求;通过易实现的平面波导结构,可在很大程度上满足光谱微型化要求。与传统的二维光谱仪不同,二维色散系统的光束在水平方向上的分离特性主要与波导结构有关,且只与耦出部分的位置有关,故消除了传统色散光谱中路径长度与小尺寸之间的矛盾,很大程度上提高了水平方向上的光谱性能。为分离垂直方向上不同波长的混叠激光,将可实现高衍射效率的体光栅作为垂直方向的色散光栅,一方面尽可能地提高最终的成像质量,另一方面保持了色散型光谱仪原有的高分辨特性。与此同时,将二维展开与高像素 CCD 面阵相结合,可获得高于一般微型光谱仪的分辨率。二维展开和平面波导微型化,在宽波长范围内可实现高衍射率和高分辨率等,使该系统具有良好的应用前景。

本实验最终搭建出一种将平面波导与光栅结合的二维光谱检测结构,该检测结构不仅充分利用了平面波导的微型化特性,还将 CCD 面阵与二维展开相结合,解决了波长测量范围与分辨率之间的矛盾,具有更好的应用前景。高精度便携式光谱仪的出现,不仅能够为人类带来便利,同时进一步推动微型化光谱仪的发展,打破微型光谱仪长期被国外垄断的局面,提升我国在该方面的核心竞争力。

## 参 考 文 献

- [1] Zuo Z, Gu C L, Peng D W, et al. Broadband mid-infrared molecular spectroscopy based on passive coherent optical-optical modulated frequency combs[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(7): 1358-1368.
- [2] 沈宇航, 倪争技, 黄元申, 等. 凸面光栅同心结构成像光谱仪的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(9): 0900002. Shen Y H, Ni Z J, Huang Y S, et al. Research progress of

- concentric imaging spectrometer with convex grating[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(9): 0900002.
- [3] Zhang Z Y, Wang Y, Wang J R, et al. Integrated scanning spectrometer with a tunable micro-ring resonator and an arrayed waveguide grating[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(5): A74-A81.
- [4] 杨增鹏, 李政言, 浦恩昌, 等. 基于离轴三反光学系统的高分辨率中阶梯光栅光谱仪[J]. *光学学报*, 2021, 41(22): 2212001. Yang Z P, Li Z Y, Pu E C, et al. High-resolution echelle grating spectrometer based on off-axis three-mirror reflective optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(22): 2212001.
- [5] 李良钊. 浅谈二维光谱的研究进展[J]. *科学与技术*, 2020(19): 1-2. Li L Z. Discussion on the research progress of two-dimensional spectroscopy[J]. *Science and Technology*, 2020(19): 1-2.
- [6] Yang Z Y, Albrow-Owen T, Cai W W, et al. Miniaturization of optical spectrometers[J]. *Science*, 2021, 371(6528): eabe0722.
- [7] 胡渝, 荣健, 胡渝. CCD 的发展现状及展望[J]. *仪器仪表学报*, 2005, 26(S1): 718-720. Hu Y, Rong J, Hu Y. The development and expectation of CCD [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, 26(S1): 718-720.
- [8] Han Y J, Rong Z Y, Zhang L, et al. Production of propagation-invariant vector beams with square array by use of 2D grating and prism[J]. *Optik*, 2019, 184: 299-303.
- [9] Xiao S J, Weiner A. 2-D wavelength demultiplexer with potential for  $\geq 1000$  channels in the C-band[J]. *Optics Express*, 2004, 12(13): 2895-2902.
- [10] Fiore A, Zhang J T, Shao P, et al. High-extinction virtually imaged phased array-based Brillouin spectroscopy of turbid biological media[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(20): 203701.
- [11] 周昊, 方波, 杨娜娜, 等. 红光波段虚像相位阵列光谱仪研究[J]. *量子电子学报*, 2021, 38(6): 788-795. Zhou H, Fang B, Yang N N, et al. Development of virtually imaged phased array spectrometer in red band[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2021, 38(6): 788-795.
- [12] Zhou X W, Scarcelli G. High sensitivity microlaser detection via VIPA-grating spectrometer with 2D dispersion[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 15-20, 2022, San Jose, California. Washington, DC: Optica Publishing Group, 2022: AT4I.1.
- [13] 朱秀丽. 全息波导显示的光能追迹与成像分析[D]. 南京: 东南大学, 2020. Zhu X L. Light energy tracing and imaging analysis of holographic waveguide display[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [14] 沈笑笑, 谭中伟, 李睿, 等. 虚像相位阵列的二维成像原理及其应用[J]. *光电技术应用*, 2012, 27(4): 59-63. Shen X X, Tan Z W, Li R, et al. Principles and applications of 2D imaging based on virtually-imaged phased array[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2012, 27(4): 59-63.
- [15] Draper C T, Bigler C M, Mann M S, et al. Holographic waveguide head-up display with 2-D pupil expansion and longitudinal image magnification[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(5): A251-A257.
- [16] 王玉瑾, 张锦, 蒋世磊, 等. 全息波导耦合元件对称结构的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(15): 152303. Wang Y J, Zhang J, Jiang S L, et al. Research on symmetric structure of holographic waveguide coupling elements[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(15): 152303.
- [17] 谭中伟, 陈志伟, 沈笑笑, 等. 基于虚像相位阵列的二维光谱映射[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(S1): 123-127. Tan Z W, Chen Z W, Shen X X, et al. 2D spectral imaging based on a virtually imaged phased array[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S1): 123-127.

# Two-Dimensional Dispersion System Based on Planar Optical Waveguides

Jia Shengping, Lu Shun, Tan Zhongwei\*

*Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education,  
Institute of Lightwave Technology, School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong  
University, Beijing 100044, China*

## Abstract

**Objective** In view of the contradiction between the high performance and small size in the micro-spectrometer, a two-dimensional (2D) dispersion system based on planar waveguide structures is proposed. With the increase in spectrometer application scenarios and the demand for device integration and light weight, the miniaturization of the spectrometer has become more demanding. Miniaturized spectrometers are divided into four main categories at present: dispersive optics, narrowband filters, Fourier transform, and reconstructive. However, most of them achieve better performance at the expense of the convenience of detection and the lightweight of the structure. At the same time, because of the restriction of the system size, there is an irreconcilable contradiction between high accuracy and wide wavelength range. To address the above problems, researchers have proposed solutions from the perspectives of increasing the wavelength measurement range and improving the wavelength resolution, respectively. But the conflict between high performance and small size still exists. The emergence of planar waveguides provides a new idea for miniaturized spectrometers. Therefore, the study on virtually imaged phase arrays (VIPA) appears, and it combines VIPA with the dispersion element to form a 2D dispersion expansion to improve the measurable wavelength and accuracy. However, the beam input conditions of VIPA are very strict, and the coating technology limits the increase in the measurable range of the wavelength. Therefore, we wish to propose a 2D dispersion system based on the lightweight of planar waveguides, with low input beam requirements and a measurable wide range of wavelengths.

**Methods** The wavelength dispersion of the system includes two progress. First, the wavelength dispersion expands in one dimension. The collimated beam is transmitted inside the waveguide because of the diffraction of the coupled-in volume grating. The symmetric structure of the coupled-in and coupled-out volume gratings allows the beam to emit at the coupled-out volume grating, at an opposite and parallel angle to the input beam. Due to the dispersion of the volume grating, the diffraction angles of different wavelengths in the beam are different, which leads to different transmission periods in the waveguide. Finally, the positions of different wavelengths reaching the coupled-out volume grating are also different, so as to achieve a dispersion, namely, one-dimensional dispersion. In the process of analyzing the coupling position, it is found that different wavelengths may overlap at the same position periodically, which is the same as VIPA's output. Secondly, by adding an orthogonal grating after the waveguide system, the overlapping wavelength is subjected to secondary dispersion in another direction. Third, different wavelengths have different angles behind the cylindrical. Then the beam can focus on different positions of the detector, so as to achieve the one-to-one correspondence between the wavelength and the position. This is the whole process of the system to achieve 2D dispersion. The principle is simulated to verify its feasibility. At the same time, by combining the definition of free spectral range and the 2D dispersion diagram, the FSR and measurable wavelength range in the system are analyzed.

**Results and Discussions** The feasibility of the system in 2D dispersion is verified through theoretical analysis and software simulation. Theoretically, the corresponding relationship between wavelength and position on the detector is given. In the next part, the system is used to detect the wavelength of the monochromatic band (Fig. 9) and the visible light band (Fig. 10). It is found that the final dispersion results are related to the thickness of the waveguide and the length of the coupled-out volume grating. Therefore, the influence of these two factors on the 2D dispersion expansion is analyzed. Finally, it is found that a thinner waveguide and longer length of the coupled-out volume grating will lead to a wider measurable wavelength range. The wavelength measurable range of proposed system is improved compared with that of VIPA. For example, the existing spectrometer based on VIPA (such as hyperfine spectrometer) generally has a detection bandwidth of only about 50 nm, up to more than 100 nm, which cannot meet the needs of many applications. In comparison, the system proposed in this paper can reach more than 200 nm. In this way, the contradiction between the small size of the system and the wide wavelength range in miniature spectrometers is broken.

**Conclusions** The 2D dispersion system based on planar waveguides proposed in this paper not only effectively utilizes the compactness of planar waveguides but also reduces the strict constraint on the input beam, and it improves the measurable range of wavelength. Meantime, combining its wavelength mapping after 2D dispersion with a high-pixel CCD array can

further improve the wavelength resolution. The final analysis results show that the 2D dispersion system based on planar optical waveguides can measure a wavelength range of more than 200 nm, which is several times higher than that of the existing VIPA technology-based structure. Moreover, the system structure is relatively simple, and the technical requirements for the incident beam are not very strict. The system maximizes the use of the compact waveguide without increasing the component cost of the system and obtains better detection performance. The system provides a new idea for the development of miniaturized spectrometers.

**Key words** diffraction; two-dimensional spectral detection; planar optical waveguide; volume grating; spectral detection