

一种高分辨率光栅光谱仪的光路设计

陈 凯¹, 庞亚军², 周克燕¹

(1. 天津市德力电子仪器有限公司, 天津 300380; 2. 天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘 要:光谱仪在光纤通信系统中具有非常重要的作用,被用于探测光源光谱辐射特征,测量光源波长、功率和信噪比等关键指标。传统光栅光谱仪通过增加光栅线数和准直光路系统焦距的办法来提高分辨率,却带来成本高、仪器体积大、调试困难等问题。为此,研究提出了基于光栅四次衍射的光谱仪光路设计,通过棱镜和平面镜的多次反射,使光信号经过四次衍射,这可极大提高分辨率并减小光路体积。研究分析了新设计的光路原理,建立了四次衍射中波长与色散率、分辨力之间的关系方程式,并使用 Zemax 软件进行了仿真模拟。仿真结果与理论计算一致,均表明新光路设计能够满足 600 nm ~ 1700 nm 波段分光,分辨力 C 波段大于 20 pm,1700 nm 时的最高分辨力为 13 pm。

关键词:光谱仪;光学设计;四次衍射;分辨率

中图分类号:TH744.1

文献标志码:A

引 言

在光纤通信领域,各种半导体激光光源、光纤放大器、滤波器等有源或无源器件的应用日益广泛,而波分复用技术的发展使得光信道间隔越来越密集,这就导致光信号在信道中传输的情况更加复杂^[1-3]。因此,无论是光纤通信系统研究机构、器件生产厂家还是运营维护机构,都需要对光信号的光谱进行探测,充分了解光源质量和经过光纤通信系统后的光信号品质,以保证光纤通信系统的性能^[4-5]。测量光谱最理想的仪器是光谱仪^[6-8],但是,目前国内光纤通信系统领域使用的光谱仪被国外垄断,其主要厂家有美国 EXFO、安捷伦、日本横河等,无国产商业化产品。

光栅光谱仪是光纤通信系统测试的主流光谱仪,其

光栅分光在波长范围、分辨率和成本等方面能够满足光纤通信系统波段的测试需求。目前光纤通信所用光栅光谱仪主要采用双通结构,即两次衍射分光系统来达到较高的分辨率,通过旋转光栅进行波长扫描,典型的如安捷伦公司的双通光路结构和中国电子科技集团 41 所的准 Littrow 光路系统等^[9-12],见表 1。

表 1 国内外光纤通信光栅光谱仪现状

厂商/型号	光路类型	波长范围 /nm	最高 FWHM /pm
中电 41 所	准 Littrow	600 - 1700	50
安捷伦/86142B	双通	600 - 1700	60
横河/AQ6370C	—	600 - 1700	20
EXFO/FTB - 5240B	四通	1250 - 1650	33
JDSU/OSA - 500	—	1250 - 1650	35

从表 1 可知,目前国内外光纤通信光栅光谱仪的光

收稿日期:2018-04-08

基金项目:科技部国家重大科学仪器设备开发专项(2014YQ510403)

作者简介:陈 凯(1985-),男,四川自贡人,助理工程师,主要从事光通信测试仪表与光谱仪器设计方面的研究,(E-mail)chenkai@deviser.com.cn

谱分辨率(FWHM)在 $60 \text{ pm} \sim 20 \text{ pm}$ 之间,光路中准直系统采用焦距为百毫米级别的球面镜,因此设备结构复杂,体积大,成本高,对调试要求很高^[13-14]。另外,大焦距的准直系统会因振动或者温度变化而引起接收光斑位置漂移,使得接收狭缝需要有机机械对准系统,这再次增加了系统复杂性和成本。

针对这一现状,本文设计了一种新型光栅光谱仪结构,其特点是使用直角棱镜和平面镜对衍射光束进行多次反射,使光束四次达到光栅表面进行衍射,得到了高于双通光路的分辨率效果。该光路设计采用了常见的光学器件,准直器件的焦距更短,调试部件少,得到了性能优良、成本低的良好效果。新设计为国内高分辨率光栅光谱仪的发展提供了重要的发展思路。

1 光路基本原理

根据光栅衍射理论,光栅的色分辨效果正比于光谱级次和光栅线数^[15]。受多种因素限制,光谱仪光路中不宜采用高级次或增加光栅线数的办法来提高分辨率。本文提出的思路是通过增加衍射次数的办法(等效于提高了光栅线数),来达到提高分辨率的目的,光路设计如图1所示。

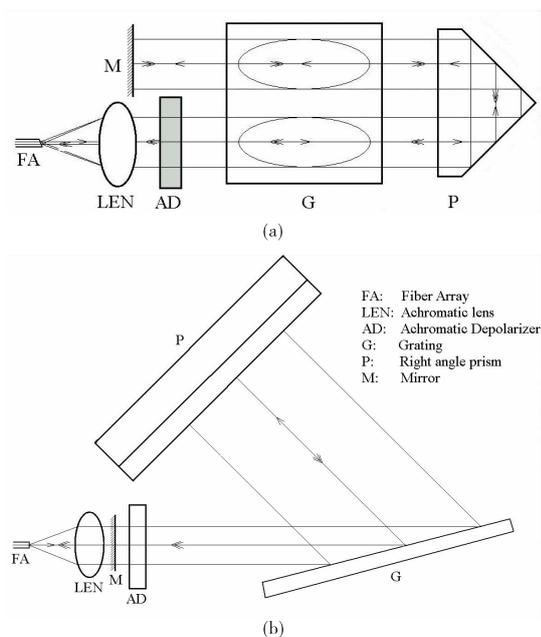


图1 高分辨率光谱仪的光路原理示意图

图1中,FA为两芯单模光纤阵列(Fiber Array),两光纤端面作为出射与代表入射狭缝,狭缝宽度是单模光

纤芯层直径,约 $9 \mu\text{m}$;LEN为消色差透镜(Achromatic Len),焦距 50 mm ;AD为消色差消偏器(Achromatic Depolarizer),可消除偏振对光栅衍射效率的影响;G为全息平面光栅(Grating),光栅常数为 900 g/mm ;P为直角棱镜(Right Angle Prism),系统设置 1700 nm 时入射角为 75° ,此时衍射光宽度最宽,因此直角棱镜应固定于长边垂直于 1700 nm 衍射光的位置;M为平面反射镜(Mirror)。

新型光路的工作原理是:待测信号通过FA的一根纤芯(入射狭缝)导入,经过消色差透镜变为平行光,使得光信号偏振度降低,同时光束第一次入射到光栅上,被衍射分光;垂直入射棱镜的衍射光被棱镜折反后第二次入射到光栅上,第二次衍射光照射到平面反射镜后被垂直反射回光栅,形成第三次衍射;第三次衍射光被棱镜再次折返后第四次照射到光栅上,第四次衍射光又通过消色差消偏器被透镜聚焦至FA的另一个光纤端面(出射狭缝),完成分光过程。通过旋转光栅,使得不同波长衍射光依次垂直入射到直接棱镜上,而只有垂直入射的光才能聚焦到出射狭缝中,从而完成光谱扫描过程。

2 光学系统分析

2.1 衍射理论

光栅四次衍射的等效衍射光路如图2所示。

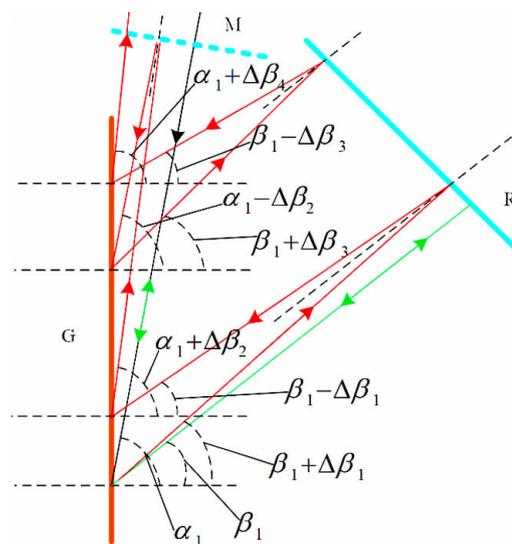


图2 四次衍射的等效衍射光路

假设 λ_0 为二面角反射棱镜处于当前位置时被选择的波长, $\lambda_0 + \Delta\lambda$ 为另外一个与其相差 $\Delta\lambda$ 的波长。当待测光被光栅第一次衍射时,两个光束分别满足下面的

光栅衍射方程:

$$d(\sin\alpha_1 + \sin\beta_1) = m\lambda_0 \quad (1)$$

$$d[\sin\alpha_1 + \sin(\beta_1 + \Delta\beta_1)] = m(\lambda_0 + \Delta\lambda) \quad (2)$$

式中, α_1 为待测光的入射角; β_1 和 $\beta_1 + \Delta\beta_1$ 分别为波长 λ_0 和波长 $\lambda_0 + \Delta\lambda$ 的第一次衍射角; $\Delta\beta_1$ 为两波长第一次衍射光的夹角; m 为衍射级次, 值为 1。

待测光经过第一次光栅衍射后, λ_0 会垂直入射二面角反射棱镜, 并被原路反射回来。而 $\lambda_0 + \Delta\lambda$ 的光束在被第二次衍射前始终与 λ_0 有 $\Delta\beta_1$ 的夹角, 再次入射光栅进行第二次衍射时, 波长 λ_0 和 $\lambda_0 + \Delta\lambda$ 分别满足以下光栅方程:

$$d(\sin\beta_1 + \sin\alpha_1) = \lambda_0 \quad (3)$$

$$d[\sin(\beta_1 - \Delta\beta_1) + \sin(\alpha_1 + \Delta\beta_2)] = (\lambda_0 + \Delta\lambda) \quad (4)$$

式中, $\Delta\beta_2$ 为两个波长第二次衍射光之间的夹角。

之后, 波长为 λ_0 的光束被平面反射镜原路返回, 再次以入射角 α_1 入射光栅发生第三次衍射, 而波长为 $\lambda_0 + \Delta\lambda$ 的光束则以入射角 $\alpha_1 - \Delta\beta_2$ 发生衍射, 因此第三次衍射中两束光分别满足从下光栅方程:

$$d(\sin\alpha_1 + \sin\beta_1) = \lambda_0 \quad (5)$$

$$d[\sin(\alpha_1 - \Delta\beta_2) + \sin(\beta_1 + \Delta\beta_3)] = \lambda_0 + \Delta\lambda \quad (6)$$

式中, $\Delta\beta_3$ 为两个波长第三次衍射光之间的夹角。

第三次衍射后, 波长 λ_0 再次被二面角反射棱镜原路反射回, 以入射角 β_1 入射光栅进行第四次衍射, 而波长 $\lambda_0 + \Delta\lambda$ 则以入射角 $\beta_1 - \Delta\beta_3$ 入射。之后, 波长 λ_0 将会按原来的入射角 α_1 衍射, 然后被双胶合透镜聚焦到出射光线端面。因此, 第四次衍射中两束光分别满足光栅方程:

$$d(\sin\beta_1 + \sin\alpha_1) = \lambda_0 \quad (7)$$

$$d[\sin(\beta_1 - \Delta\beta_3) + \sin(\alpha_1 + \Delta\beta_4)] = \lambda_0 + \Delta\lambda \quad (8)$$

式中 $\Delta\beta_4$ 为两波长第三次衍射后衍射光之间的夹角。

对于小角度 $\Delta\beta_1$ 、 $\Delta\beta_2$ 、 $\Delta\beta_3$ 和 $\Delta\beta_4$, 可做如下近似: $\sin\Delta\beta_1 = \Delta\beta_1$, $\cos\Delta\beta_1 = 1$; $\sin\Delta\beta_2 = \Delta\beta_2$, $\cos\Delta\beta_2 = 1$; $\sin\Delta\beta_3 = \Delta\beta_3$, $\cos\Delta\beta_3 = 1$; $\sin\Delta\beta_4 = \Delta\beta_4$, $\cos\Delta\beta_4 = 1$ 。联立式(1)、(2)、(4)、(6)和(8)可得四次色散公式(9)与(10):

$$\frac{\Delta\beta_4}{\Delta\lambda} = \frac{4}{d\cos\alpha_1} \quad (9)$$

$$\frac{\Delta l}{\Delta\lambda} = \frac{4f}{d\cos\alpha_1} \quad (10)$$

式中 f 为消色差透镜焦距。

2.2 波长与入射角关系

新系统设置 1700 nm 时的入射角为 75° , 根据式(1)得衍射角为 34.338° , 此时入射光与该衍射角的差值为 $A = 75^\circ - 34.33^\circ = 40.662^\circ$, 因此只有当经过透镜准直的平行光与某一波长的衍射光夹角为 A 时, 该衍射光才能垂直入射到棱镜中, 最终聚焦到出射狭缝, 因此:

$$\alpha_1 - \beta_1 = A \quad (11)$$

与光栅方程式(1)联立得:

$$2d\sin\left(\alpha_1 - \frac{A}{2}\right)\cos\left(\frac{A}{2}\right) = \lambda \quad (12)$$

由此得到了旋转光栅的波长与入射角的关系。

3 仿真分析

使用 Zemax 软件对四次衍射光路进行仿真模拟, 如图 3 所示。

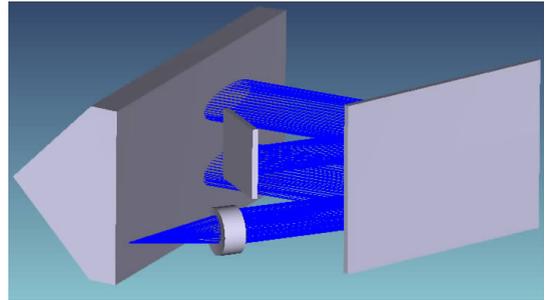


图3 Zemax 光路仿真

绘制了与中心波长 600 nm, 1310 nm, 1550 nm 和 1700 nm 相距 20 pm 的点列图, 如图 4 所示, 图中圆圈为艾里斑直径。

联立式(10)与(12), 得到 600 nm - 1700 nm 范围与 20 pm 波长的间隔距离, 如图 5 所示。

从图 4 和图 5 可知, 新光路设计可将 20 pm 波长间隔很好地分离, 且波长越长线色散越大, 波长分离距离也就越大, 由此说明仿真结果与理论计算符合。

4 分辨力分析

光谱仪光路分辨力由多种因素决定, 最主要限制因

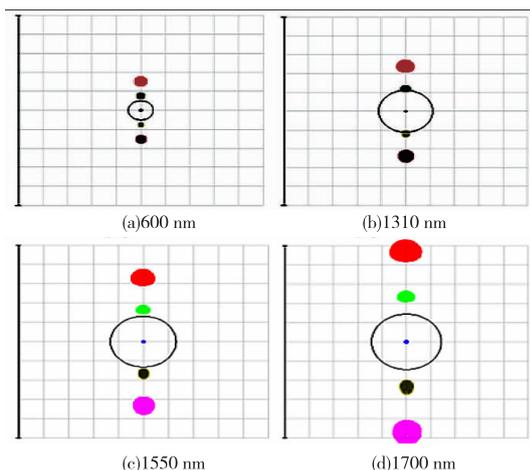


图4 点列图

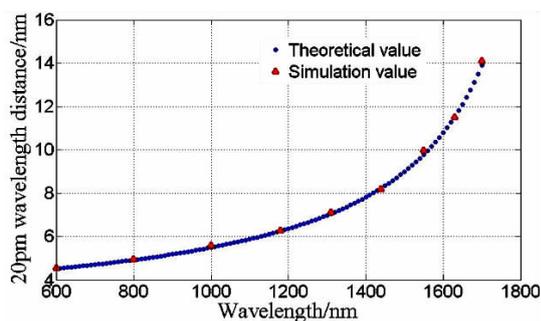


图5 20 pm 波长间隔距离

素是艾里斑直径与接收狭缝宽度。从图3可知,从600 nm ~ 1700 nm,艾里斑直径均小于20 pm 波长间距。由于接收狭缝为两芯单模光纤阵列中的一根光纤端面芯层,直径 D 约为9 μm ,代入(10)式,则该光路的光谱分辨力为^[16-17]:

$$\frac{D\Delta\lambda}{\Delta l} = \frac{Dd\cos\alpha_1}{4f} \quad (13)$$

与(12)式联立得波长与分辨力关系,由此绘制的分辨力曲线如图6所示。

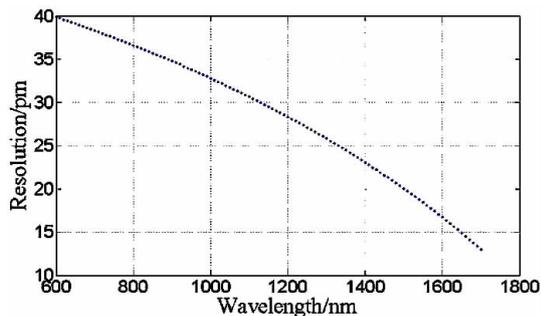


图6 分辨力曲线

从图6可知,新光路设计能够满足600 nm ~ 1700 nm

波段的分光,分辨力随波长变化,波长越大分辨力越小,波长大于1510 nm 时分辨力大于20 pm,而在1700 nm 处时达到的最大分辨力为13 pm。

5 结论

(1)设计了基于光栅四次衍射的光纤通信光谱仪光路,采用光纤阵列作为出射和入射狭缝、消色差透镜与消色差消偏器作为准直和消偏器件、光栅分光、直角棱镜与平面镜进行反射和衍射光。新光路设计通过实现四次衍射来提高分辨率,同时减小光路体积,降低调试难度。

(2)通过理论分析得到了新光路光栅进行四次衍射的分辨率方程,同时进行了仿真模拟,理论计算与仿真结果相符,均表明新光路设计能够应用于光纤通信600 nm ~ 1700 nm 波段的分光,分辨力达到了C波段的20 pm,1700 nm 处的分辨力为13 pm,可实现对光谱的高分辨率探测。

参考文献:

- [1] 阎兆鹏,聂敏,杨光.光纤信道中量子信令的传输损伤及修复策略[J].通信学报,2015,36(7):185-190.
- [2] 冯一乔.高速光纤通信奈奎斯特系统中信道损伤均衡的研究[D].北京:北京邮电大学,2017.
- [3] 赵海燕.钒资源利用概况及我国钒市场需求分析[J].矿产保护与利用,2014(2):54-58.
- [4] LI L L, WU J, LI J D. Investigation of OSNR monitoring technique based on the beat noise detection [J]. Optics Communications, 2015, 342: 259-263.
- [5] 李梦琦,何晶,陈林.基于相干检测的Nyquist信号光纤传输技术研究[J].光通信,2016,40(9):13-15.
- [6] 王刚,张家奎,李连葆.为DWDM测试选择最佳光谱分析仪[J].安徽电子信息职业技术学院学报,2006(6):91-93.
- [7] 章春晖.基于光栅的光信道监测技术的研究[D].武汉:华中科技大学,2012.
- [8] 吴浩.超密集WDM系统测量中OSA的应用[J].通讯世界,2007(9):61.
- [9] 孟鑫,李立功,韩顺利,等.基于准Littrow结构的高动

- 态近红外光谱仪研究[J].光学学报,2017,37(10):343-349.
- [10] 唐子贤,吕国强.双通单色仪在高性能光谱分析仪中的应用[J].国外电子测量术,2005(12):43-45.
- [11] 郑宝华,程德福,郑志忠,等.宽谱段光纤光谱仪[J].光谱学与光谱析,2010,30(5):1417-1421.
- [12] 贺永亮.一种高性能光谱分析仪的设计方案[D].合肥:合肥工业大学,2006.
- [13] 唐玉国,宋楠,巴音贺希格,等.中阶梯光栅光谱仪的光学设计[J].光学精密工程,2010,18(9):1989-1995.
- [14] 张军,王茂芝,陈聆,等.插值算法在高光谱数据中的应用[J].四川理工学院学报:自然科学版,2012,25(3):43-46.
- [15] 郁道银.工程光学[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [16] 林中,范世福.光谱仪器学[M].北京:机械工业出版社,1988.
- [17] 杨晓冬,李正灯,李惠玲,等.光栅光谱仪入射与出射狭缝宽度对测量谱线线宽影响研究[J].嘉应学院学报,2008,26(6):38-41.

An Optical Path Design of High-resolution Grating Spectrometer

CHEN Kai¹, PANG Yajun², ZHOU Keyan¹

(1. Tianjin Deviser Electronics Instrument Co., Ltd., Tianjin 300380, China; 2. State Laboratory of Opto-electronics Information Technology, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The use of spectrometers to detect the spectral radiation characteristics of light sources and measure key indicators such as wavelength, power and signal-to-noise ratio of light sources are very important measurement instruments in optical fiber communication systems. In order to increase the resolution, the conventional grating spectrometer uses the method of increasing the number of grating lines and increasing the aperture of the collimated light path system, which results in the disadvantages of expensive devices, large size, and the like. In order to solve this problem, a spectrometer optical path design based on holographic grating fourth-order diffraction is proposed. Through multiple reflections of the prism and the planar mirror, the optical signal is subjected to four diffractions, which greatly improved the resolution and reduced the optical path volume. The principle of the optical path is analyzed in detail, and the relationship between the wavelength, dispersion rate, and resolution of the fourth-order diffraction is established. The use of Zemax software simulations shows that the optical path design can meet the spectral requirements of the 600 nm-1700 nm band, the C-band resolution is greater than 20 pm, and the maximum resolution of 1700 nm is 13 pm.

Key words: spectrometer; optical design; fourth-order diffraction; resolution