

集成光波导静态傅里叶变换微光谱仪分辨率倍增方法

李金洋 逯丹凤 祁志美

End-face reflected LiNbO<sub>3</sub> waveguide based stationary miniature Fourier transform spectrometer with two-fold enhanced spectral resolution

Li Jin-Yang Lu Dan-Feng Qi Zhi-Mei

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 64, 114207 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.114207

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114207>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I11>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于 Hilbert 变换实现数字全息高精度相位重建

[High accuracy phase reconstruction of digital hologram by Hilbert transform](#)

物理学报.2014, 63(19): 194207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.194207>

时空联合调制成像光谱仪前置成像系统分析与设计

[Design and analysis for the front imaging optical system of the spatiotemporal mixed modulated Fourier transform imaging spectrometer](#)

物理学报.2014, 63(10): 100701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.100701>

利用小尺寸电荷耦合器件实现数字全息高分辨成像

[High-resolution digital holographic microscopy realized by small size CCD camera](#)

物理学报.2013, 62(24): 244203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.244203>

基于同态信号处理的数字全息广义线性重建算法研究

[Generalized linear reconstructing algorithm based on homomorphic signal processed in digital holographic microscopy](#)

物理学报.2013, 62(23): 234207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.234207>

高质量等曲率物参光像面数字全息显微系统

[High-quality digital image-plane micro-holographic system with the same wavefront curvature of reference and object wave](#)

物理学报.2013, 62(2): 024207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.024207>

# 集成光波导静态傅里叶变换微光谱仪 分辨率倍增方法\*

李金洋<sup>1)</sup> 逯丹凤<sup>1)</sup> 祁志美<sup>1)2)†</sup>

1)(中国科学院电子学研究所, 传感技术国家重点实验室, 北京 100190)

2)(国民核生化灾害防护国家重点实验室, 北京 102205)

(2014年7月17日收到; 2014年12月5日收到修改稿)

研究了铌酸锂波导静态傅里叶变换微光谱仪分辨率的影响因素, 并在此基础上提出了一种采用端面反射铌酸锂波导结构提高微光谱仪光谱分辨率的方法. 该方法容许在减小铌酸锂波导静态傅里叶变换微光谱仪尺寸的同时, 使两干涉臂间最大光程差增大1倍, 从而使其光谱分辨率实现倍增. 采用商业化铌酸锂波导电光调制器构建了一个傅里叶变换光谱仪原理样机, 并对样机在不同波长下的光谱分辨率进行了测量, 结果指出对调制器加载端面反射结构后获得的光谱分辨率是加载端面反射结构前的2倍, 与理论分析结果完全一致. 这种光波导端面反射结构制作工艺简单, 易于实现, 是一种提高集成光波导静态傅里叶变换微光谱仪分辨率的有效手段.

**关键词:** 铌酸锂波导, 傅里叶变换微光谱仪, 光谱分辨率, 端面反射

**PACS:** 42.30.Kq, 07.57.Ty, 42.40.Lx, 78.20.Jq

**DOI:** 10.7498/aps.64.114207

## 1 引言

作为一种分析物质组成成分及其结构的重要分析仪器, 傅里叶变换光谱仪具有光谱分辨率高、光通量大、信噪比高、扫描速度快等优点, 在环境监测、食品安全检测、防化反恐、生物医学、石油化工、空间探测、材料研发等众多领域有着广泛应用<sup>[1-9]</sup>. 为满足现场实时快速测试和航空航天应用的需求, 具有体积小、重量轻、可携带等优点的傅里叶变换微光谱仪成为傅里叶变换光谱仪发展的主要方向. 微电子机械系统(MEMS)技术的发展使基于MEMS动镜的傅里叶变换微光谱仪得到了快速发展<sup>[5-9]</sup>. 这类傅里叶变换微光谱仪多采用迈克尔逊干涉仪结构, 通过采用电梳驱动、电磁驱动、热致驱动等方法改变MEMS动镜位置实现对光程差的调制. 但是这种基于MEMS动镜的傅里叶变换

微光谱仪具有可移动部件, 抗机械振动能力差, 性能易受环境温度、湿度、气压变化的干扰, 反射镜在调制过程中需保持平行移动, 对驱动系统提出了较高的要求. 此外, 由于傅里叶变换微光谱仪的体积限制了动镜的扫描距离, 其光谱分辨率劣于传统的桌上型傅里叶变换光谱仪.

为克服上述问题, 我们在近期的研究中报导了一种基于铌酸锂电光调制波导马赫-曾德尔干涉仪(MZI)半波电压与波长间依赖关系的静态傅里叶变换微光谱仪<sup>[10]</sup>. 这种傅里叶变换微光谱仪具有由铌酸锂波导构成的MZI和推挽调制电极, 利用铌酸锂电光效应来实现对光程差的调制, 即通过改变施加在调制电极上的调制电压, 得到MZI输出光强随调制电压变化的干涉图谱. 对上述干涉图谱进行离散傅里叶变换, 可以得到待测光信号入射光功率随半波电压的分布曲线. 结合预先测量得到的

\* 国家自然科学基金(批准号: 60978042, 61377064)、北京市自然科学基金(批准号: 3131001)、中国科学院科研装备研制项目(批准号: YZ201106)和国民核生化灾害防护国家重点实验室开放基金(批准号: SKLNBC2014-11)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhimei-qi@mail.ie.ac.cn

铌酸锂 MZI 半波电压与波长的依赖关系, 将入射光功率随半波电压的分布曲线转换为入射光功率随波长的分布曲线, 实现对待测光信号入射光谱的测量. 该傅里叶变换微光谱仪不含运动部件, 抗震能力强, 结构紧凑, 体积小, 重量轻, 能耗低, 可用于快速现场探测.

但遗憾的是, 由于调制电极长度的限制, 上述报道中的铌酸锂波导静态傅里叶变换微光谱仪样机的光谱分辨率仍不令人满意, 导致该傅里叶变换微光谱仪的应用范围受到了较大的限制. 前期的研究通过对波导和电极结构参数进行优化, 如采用铌酸锂脊形波导<sup>[11]</sup>, 以提高电光调制效率, 可以在一定程度上提高铌酸锂波导静态傅里叶变换微光谱仪的光谱分辨率.

在上述研究的基础上, 本文通过分析傅里叶变换光谱仪分辨率的影响因素, 提出了一种通过采用端面反射结构, 在减小铌酸锂波导静态傅里叶变换微光谱仪尺寸的同时, 使其光谱分辨率倍增的方法, 并在实验上对该方法进行了验证. 实验结果与理论推导具有很好的一致性, 说明该方法可以有效提高铌酸锂波导静态傅里叶变换微光谱仪的光谱分辨率.

## 2 理论模型

由傅里叶变换光谱仪的工作原理可以知道, 其光谱分辨率由最大光程差  $\delta_{\max}$  决定<sup>[12,13]</sup>. 本文中采用对单色光信号进行测量得到的光谱半高峰宽 (FWHM) 作为傅里叶变换光谱仪在该单色光波长下的光谱分辨率<sup>[14-16]</sup>, 有

$$\Delta\lambda_{\text{FWHM}} = \frac{0.603}{\delta_{\max}} \cdot H, \quad (1)$$

其中,  $H$  为窗函数引入的分辨率因子, 本文中选用高斯窗函数对干涉图谱进行切趾处理以抑制测得的光谱中的旁瓣干扰,  $H = 1.682$ <sup>[17]</sup>. 上述铌酸锂波导静态傅里叶变换微光谱仪中, MZI 两臂中导波光的最大光程差  $\delta_{\max}$  由施加的最大调制电压  $U_{\max}$  和铌酸锂波导 MZI 半波电压  $V_{\pi}$  共同决定:

$$\delta_{\max} = \frac{U_{\max}}{2V_{\pi}} \cdot \lambda, \quad (2)$$

其中, 最大调制电压  $U_{\max}$  受到铌酸锂波导击穿电场的限制. 另一方面, 半波电压则取决于所采用的铌酸锂波导 MZI 和推挽调制电极的结构参数<sup>[18]</sup>

$$V_{\pi} = \frac{\lambda d}{2n_e^3 r_{33} \Gamma L}, \quad (3)$$

其中,  $n_e$  为铌酸锂晶体非寻常光折射率,  $r_{33}$  为铌酸锂晶体最大电光系数,  $d$  为推挽调制电极间距,  $\Gamma$  为电光重叠积分因子,  $L$  为推挽调制电极长度. 从 (3) 式可以看出, 通过减小电极间距  $d$ 、提高电光重叠积分因子  $\Gamma$ 、增大电极长度  $L$ , 可以有效降低半波电压, 从而提高铌酸锂波导静态傅里叶变换微光谱仪分辨率. 其中, 电光重叠积分因子  $\Gamma$  可以通过对波导和电极的结构参数进行优化得到提高<sup>[11,19]</sup>, 但是电极间距  $d$  和电极长度  $L$  则分别受到铌酸锂波导击穿电场和傅里叶变换微光谱仪尺寸的限制.

考虑到增大电极长度  $L$  的本质在于增大受到调制电压作用而产生折射率变化的区域的范围, 从而提高干涉臂中导波光在该区域中的传播距离, 以获得更大的由调制电压导致的光程变化; 在本文中, 我们提出采用端面反射结构, 使干涉臂中的导波光往返经过受调制区域, 达到最大光程差倍增的效果, 从而在减小铌酸锂波导静态傅里叶变换微光谱仪尺寸的同时, 提高其光谱分辨率.

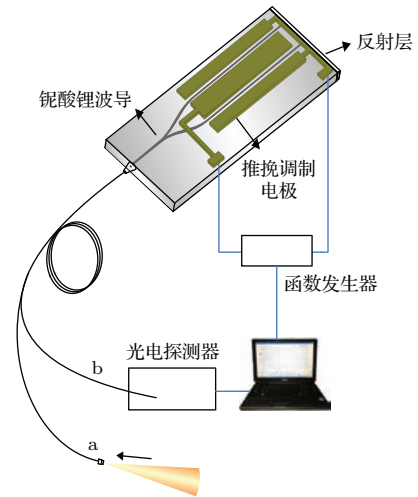


图1 具有端面反射结构的铌酸锂波导静态傅里叶变换微光谱仪

Fig. 1. Schematic of the LiNbO<sub>3</sub> waveguide based Fourier transform spectrometer with end-face reflection configuration.

具有端面反射结构的铌酸锂波导静态傅里叶变换微光谱仪结构如图1所示. 该傅里叶变换微光谱仪具有一个铌酸锂波导 Y 分支, Y 分支的两个分支波导分别构成干涉臂, 干涉臂端面处设置有由金属薄膜构成的反射层. 为制备该反射层, 首先将铌酸锂波导芯片进行端面抛光, 然后采用溅射工艺在波导端面淀积金或铝薄膜, 为了增强金属反射层与波导的附着力, 在溅射金属薄膜之前, 可以在波导端面先淀积数纳米厚的铬膜或钛膜. 采用一个 Y 分

支光纤实现待测光信号的输入和干涉光信号的输出, 由Y分支光纤的一个分支光纤a对待测光信号进行收集, 收集后的待测光信号通过Y分支光纤的主光纤支耦合进入铌酸锂波导. 待测光信号经铌酸锂波导Y分支后形成两路相同的光信号, 分别在两干涉臂中传播. 两臂中的光信号经过受调制区域后分别由干涉臂端面处的反射层反射, 沿原路径反向传播, 再次经过受调制区域后由铌酸锂波导Y分支合束, 发生干涉. 干涉光信号耦合进入Y分支光纤主光纤支, 并由光电探测器在Y分支光纤的另一分支光纤b端口进行探测. 两干涉臂受到相同大小不同方向的调制电场作用, 不同干涉臂中导模的有效折射率产生等值异号的变化, 并使干涉光信号强度随着调制电压的变化而变化. 由于两臂光信号在受调制区域内的传播距离为 $2L$ , 干涉光信号的半波电压可以写为

$$V'_\pi = \frac{\lambda d}{4n_e^3 r_{33} \Gamma L}. \quad (4)$$

由(2), (3), (4)式可以看出, 在保持电极间距 $d$ 、电光重叠积分因子 $\Gamma$ 、电极长度 $L$ 等参数不变的情况下, 具有端面反射结构的铌酸锂波导静态傅里叶变换微光谱仪的半波电压是文献[10]报道的铌酸锂波导静态傅里叶变换微光谱仪的1/2, 即在相同的调制电压作用下, 前者的最大光程差是后者的2倍; 说明采用端面反射结构能够使铌酸锂波导静态傅里叶变换微光谱仪分辨率实现倍增.

需要指出的是, 与基于铌酸锂波导MZI的傅里叶变换微光谱仪不同, 上述采用端面反射结构的铌酸锂波导静态傅里叶变换微光谱仪仅含有一个Y分支结构; 因此, 在保持电极长度不变的情况下该微光谱仪能够具有更小的器件尺寸, 或在同样大小的铌酸锂波导芯片内可以容许更长的调制电极, 从而使铌酸锂波导静态傅里叶变换微光谱仪的光谱分辨率得到进一步提高. 同时, 为增大铌酸锂波导芯片内受调制区域的比例, 反射层可以由推挽调制电极一端构成, 这种电极和反射层一体化的结构也降低了铌酸锂波导芯片的制备难度.

### 3 实验

根据已报道的研究[10], 本文使用具有铌酸锂MZI和推挽调制电极的商业化电光调制器(JDSU OC-192)搭建了铌酸锂波导静态傅里叶光谱仪原理样机, 并采用该光谱仪样机对单色光源进行测

量, 以得到单色光源对应波长下样机的光谱分辨率. 待测光信号经过电光调制器后进入InGaAs光电探测器; 通过对电光调制器输出光强随调制电压变化的干涉图谱进行离散傅里叶变换, 并结合电光调制器半波电压与波长间的函数依赖关系, 可以得到待测光信号的入射光谱.

首先采用一系列不同波长的分布反馈(DFB)激光器, 对电光调制器在对应波长下的半波电压 $V_\pi$ 进行测量, 测量结果如图2所示. 通过对测量数据的多项式拟合可以得到电光调制器半波电压 $V_\pi$ 与波长 $\lambda$ 间的单调函数依赖关系:

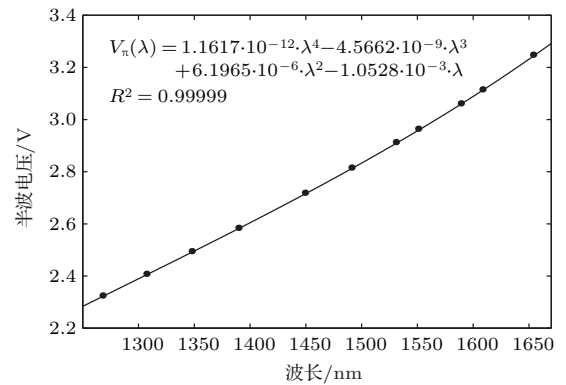


图2 实验测得的铌酸锂波导电光调制器半波电压与波长的依赖关系

Fig. 2. Wavelength dependence of the half-wave voltage measured with the LiNbO<sub>3</sub> waveguide based electro-optic modulator.

$$V_\pi(\lambda) = 1.16173 \cdot \lambda^4 - 4.56623 \cdot \lambda^3 + 6.19651 \cdot \lambda^2 - 1.05277 \cdot \lambda \quad (\lambda : \mu\text{m}). \quad (5)$$

将波长为1550.7 nm的DFB激光器作为待测光源进行测量, 施加在电光调制器推挽调制电极上的调制电压从-60 V到+60 V变化, 电光调制器输出光强随调制电压变化的干涉图谱如图3插图所示. 采用高斯窗函数对干涉图谱进行切趾处理后, 由干涉图谱的离散傅里叶变换可以得到入射光功率随半波电压的分布曲线. 结合(5)式中电光调制器半波电压与波长的单调函数依赖关系, 由入射光功率随半波电压的分布曲线得到1550.7 nm激光器的发射光谱, 如图3所示. 由图3可以看出, 该傅里叶变换光谱仪样机在1550.7 nm处的光谱分辨率( $\Delta\lambda_{\text{FWHM}}$ )为115.1 nm.

为验证采用端面反射结构对铌酸锂波导静态傅里叶变换微光谱仪分辨率的增益效果, 本文通过在上述电光调制器光输出端尾纤处连接光纤反射



镜, 获得了与图 1 所示的铌酸锂波导静态傅里叶变换微光谱仪的输出光信号等效的光信号成分. 通过对由该光信号成分得到的待测光信号入射光谱进行分析, 即可得到采用端面反射结构后傅里叶变换光谱仪样机的光谱分辨率.

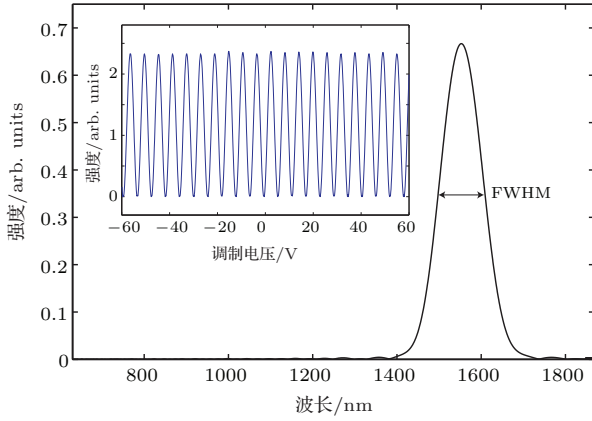


图 3 利用傅里叶变换微光谱仪样机反演得到的 1550.7 nm 激光器发射光谱 (插图: 在调制电压从 -60 V 变化至 +60 V 的过程中测得的光电调制器输出光强变化)  
 Fig. 3. The laser emission spectrum retrieved using the prototype Fourier transform spectrometer (Inset: the interferogram measured at 1550.7 nm with varying the modulating voltage from -60 V to 60 V).

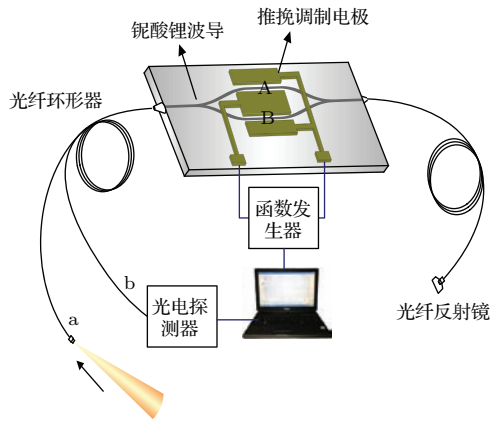


图 4 实验装置示意图 (在光电调制器光输出端连接光纤反射镜以增强光谱分辨率)  
 Fig. 4. Experimental setup for demonstrating the spectral resolution enhancement by means of the end face reflection configuration.

如图 4 所示, 待测光信号由 Y 分支光纤的一个分支光纤 a 收集后, 通过 Y 分支光纤的主光纤支耦合进入光电调制器, 经过光电调制器的光信号经光纤反射镜反射后再次通过光电调制器, 并由 Y 分支光纤的另一个分支光纤 b 输出至 InGaAs 光电探测器进行探测. 分支光纤 b 输出的光信号强度随在光电调制器推挽电极上施加的调制电压的变化而变

化, 该输出光信号强度  $I$  随调制电压  $U$  的变化关系可以写作

$$\begin{aligned}
 I(U) &= \frac{1}{4} I_0 \cdot \left[ 1 + \cos \left( \frac{U}{V_\pi} \cdot \pi \right) \right] \\
 &\quad \times \left[ 1 + \cos \left( \frac{U}{V_\pi} \cdot \pi \right) \right] \\
 &= \frac{1}{4} I_0 \cdot \left[ 1 + 2 \cdot \cos \left( \frac{U}{V_\pi} \cdot \pi \right) \right. \\
 &\quad \left. + \cos^2 \left( \frac{U}{V_\pi} \cdot \pi \right) \right] \\
 &= \frac{1}{8} I_0 \cdot \left[ 3 + 4 \cdot \cos \left( \frac{U}{V_\pi} \cdot \pi \right) \right. \\
 &\quad \left. + \cos \left( 2 \cdot \frac{U}{V_\pi} \cdot \pi \right) \right], \tag{6}
 \end{aligned}$$

其中,  $I_0$  为待测光信号的入射光强度,  $V_\pi$  为光电调制器的半波电压. 光电调制器 MZI 干涉臂 A 或 B 中传播的光信号经光纤反射镜反射后反向传播再次进入光电调制器 MZI 时, 分别有 50% 的光信号进入干涉臂 A, 50% 的光信号进入干涉臂 B. 同时, 光信号分别在干涉臂 A, B 中传播时, 对应的有效折射率在调制电压的作用下发生等值异号的变化. 因此, 分支光纤 b 输出的光信号可以看作以下光信号间的干涉:

- 1) 依次经过干涉臂 A 和干涉臂 B 的光信号, 该光信号由调制电压引起的光程变化为  $\Delta L = 0$ ;
- 2) 往返经过干涉臂 A 的光信号, 该光信号由调制电压引起的光程变化为  $\Delta L = \frac{U}{2V_\pi} \cdot \lambda$ ;
- 3) 往返经过干涉臂 B 的光信号, 该光信号由调制电压引起的光程变化为  $\Delta L = -\frac{U}{2V_\pi} \cdot \lambda$ .

可以看出, 2) 类光信号与 3) 类光信号间由调制电压引起的光程差为  $\delta' = \frac{U}{2V'_\pi} \cdot \lambda = \frac{U}{V_\pi} \cdot \lambda$ . 其中,  $V'_\pi$  为 2) 类光信号与 3) 类光信号间干涉光信号对应的半波电压. 因此, 2) 类光信号与 3) 类光信号间的干涉光信号对应于 (6) 式中第三项, 与图 1 所示的铌酸锂波导静态傅里叶变换微光谱仪的输出光信号等效. 该干涉光信号的半波电压  $V'_\pi$  是所用光电调制器半波电压  $V_\pi$  的 1/2, 结合 (5) 式可以得到

$$\begin{aligned}
 V'_\pi(\lambda) &= 0.58087 \cdot \lambda^4 - 2.28312 \cdot \lambda^3 + 3.09826 \cdot \lambda^2 \\
 &\quad - 0.52639 \cdot \lambda \quad (\lambda : \mu\text{m}). \tag{7}
 \end{aligned}$$

1) 类光信号与 2) 类光信号或 3) 类光信号间的干涉光信号则对应于 (6) 式中第二项, 其半波电压与光电调制器半波电压  $V_\pi$  相同. 由于不同干涉光信号对应的半波电压存在差异, 通过对分支光纤 b 输出

光强随调制电压变化的干涉图谱进行离散傅里叶变换,可以得到位于不同半波电压区域的干涉光信号成分,从而实现从2)类光信号与3)类光信号间干涉光信号的提取。

由分支光纤a对波长为1550.7 nm的DFB激光器的输出光信号进行收集,调制电压保持从-60 V到+60 V变化,分支光纤b输出光强随调制电压变化的干涉图谱如图5所示。

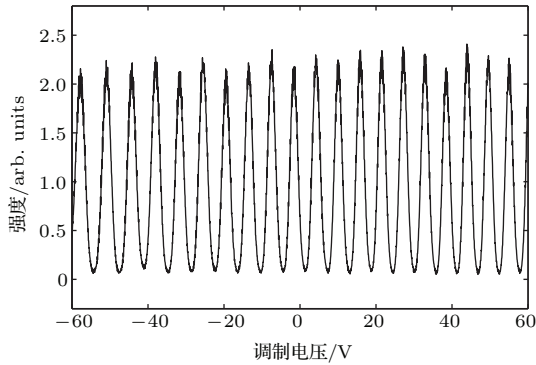


图5 在采用光纤反射镜的条件下测得的傅里叶变换微光谱仪样机输出端光信号强度随调制电压的变化(入射光源为1550.7 nm波长激光器)

Fig. 5. Output light intensity of the prototype Fourier transform spectrometer as a function of the modulating voltage measured with the fiber reflector and at  $\lambda = 1550.7$  nm.

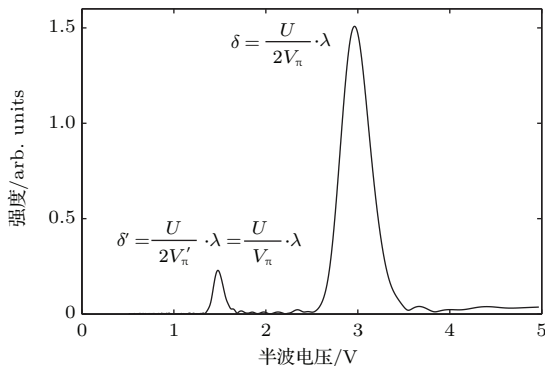


图6 对图5所示结果进行傅里叶变换得到的入射光功率随半波电压的分布曲线

Fig. 6. Input light power versus the half-wave voltage obtained by the Fourier transform processing of the data shown in Fig. 5.

通过对上述干涉图谱进行离散傅里叶变换,得到激光器输出光信号入射光功率随半波电压的分布曲线,如图6所示。从该曲线上可以看出,两个不同大小的信号峰出现在不同半波电压区域,其中位于半波电压较小的区域内的信号峰对应于2)类光信号与3)类光信号间的干涉光信号。结合(7)式,将该区域的半波电压坐标转换为对应的波长,得到1550.7 nm激光器的发射光谱,如图7所示。为

方便比较采用端面反射结构前后光谱仪样机分辨率的不同,图7同时给出了未采用端面反射结构时测量得到的激光器发射光谱。可以看出,采用端面反射结构后样机在1550.7 nm处的光谱分辨率( $\Delta\lambda_{FWHM}$ )为57.6 nm,是采用端面反射结构前光谱分辨率( $\Delta\lambda_{FWHM} = 115.1$  nm)的一半,与理论预测十分符合。为进一步说明这一点,分别使用波长位于电光调制器铌酸锂波导单模区间内的不同激光器作为待测光源,依照上述实验方法,测量采用端面反射结构前后对应波长下样机的光谱分辨率。测量结果如图8所示,表明在不同波长下采用端面反射结构后测得的单色光谱的FWHM均为采用端面反射结构前的一半。从上述实验结果可以看出,通过采用端面反射结构,可以使铌酸锂波导静态傅里叶变换光谱仪在其单模工作区间内任意波长下的光谱分辨率实现倍增。

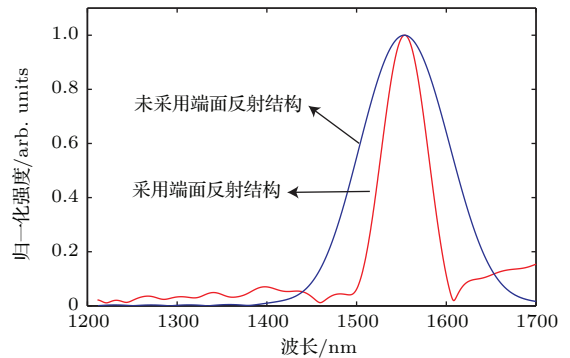


图7 利用傅里叶变换微光谱仪样机在采用端面反射结构前后获得的1550.7 nm激光光源发射光谱的比较

Fig. 7. Comparison of the retrieved laser emission spectra obtained with and without the end-face reflection configuration (the input laser wavelength is 1550.7 nm).

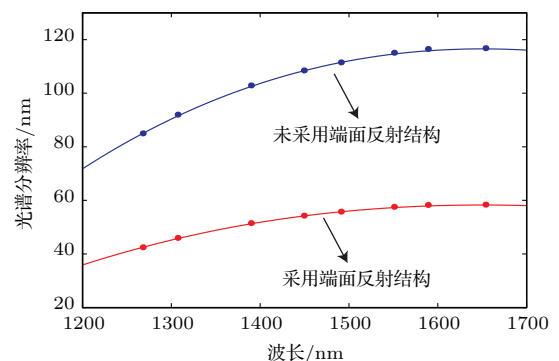


图8 傅里叶变换微光谱仪样机在采用端面反射结构前后的光谱分辨率随波长的变化

Fig. 8. Wavelength dependence of spectral resolution for the prototype Fourier transform spectrometer with and without the end-face reflection configuration.

需要指出的是, 由于采用端面反射结构的方法不涉及对波导、电极结构参数的改变, 该方法与通过优化波导、电极结构参数以提高铌酸锂波导静态傅里叶变换微光谱仪分辨率的方法具有很好的兼容性.

## 4 结 论

本文在分析铌酸锂波导静态傅里叶变换微光谱仪分辨率影响因素的基础上, 通过引入端面反射结构, 提出了一种在减小铌酸锂波导静态傅里叶变换微光谱仪尺寸的同时, 使其光谱分辨率倍增的方法. 为验证该方法的有效性, 采用铌酸锂波导电光调制器搭建了傅里叶变换光谱仪原理样机, 并在实验中比较了采用端面反射结构前后在不同波长下样机的光谱分辨率. 实验结果表明, 在保持电极间距、电光重叠积分因子、电极长度等参数不变时, 采用端面反射结构后测得的单色光谱的FWHM均为采用端面反射结构前的一半, 即通过采用端面反射结构使铌酸锂波导静态傅里叶变换微光谱仪分辨率提高了1倍, 与理论分析十分符合. 该方法对进一步研究具有高光谱分辨率的集成光波导静态傅里叶变换微光谱仪具有重要的指导意义; 同时也可用于降低电光调制器的半波电压, 为高性能电光调制器件的设计提供了参考.

## 参考文献

- [1] Coarer E L, Blaize S, Benech P, Stefanon I, Morand A, Lérondel G, Leblond G, Kern P, Fedeli J M, Royer P 2007 *Nat. Photonics* **1** 473
- [2] Mendes L S, Oliveira F C C, Suarez P A Z, Rubim J C 2003 *Anal. Chim. Acta* **493** 219
- [3] Li X X, Gao M G, Xu L, Tong J J, Wei X L, Feng M C, Jin L, Wang Y P, Shi J G 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 030202 (in Chinese) [李相贤, 高闽光, 徐亮, 董晶晶, 魏秀丽, 冯明春, 金岭, 王亚萍, 石建国 2013 物理学报 **62** 030202]
- [4] Dong L, Sun G S, Zheng L, Liu X F, Zhang F, Yan G G, Zhao W S, Wang L, Li X G, Wang Z G 2012 *Chin. Phys. B* **21** 047802
- [5] Manzardo O, Herzig H P, Marxer C R, Rooij N F 1999 *Opt. Lett.* **24** 1705
- [6] Wallrabe U, Solf C, Mohr J, Korvink J G 2005 *Sens. Actuators A* **123–124** 459
- [7] Ataman Ç, Urey H 2009 *Sens. Actuators A* **151** 9
- [8] Yu K, Lee D, Krishnamoorthy U, Park N, Solgaard O 2005 *Sens. Actuators A* **130–131** 523
- [9] Chen J J, Zhu Y, Liu B, Wei W, Wang N, Zhang J 2013 *Chin. Opt. Lett.* **11** 053003
- [10] Li J Y, Lu D F, Qi Z M 2014 *Opt. Lett.* **39** 3923
- [11] Li J Y, Yao Y Q, Wu J J, Qi Z M 2013 *Acta Optica Sinica* **33** 196 (in Chinese) [李金洋, 要彦清, 吴建杰, 祁志美 2013 光学学报 **33** 196]
- [12] Griffiths P R, Haseth J A D 2007 *Fourier Transform Infrared Spectrometry* (New York: Wiley-Interscience) pp26–30
- [13] Li J, Zhu J P, Zhang Y Y, Liu H, Hou X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 024205 (in Chinese) [李杰, 朱京平, 张云尧, 刘宏, 侯洵 2013 物理学报 **62** 024205]
- [14] Kauppinen J K 1984 *Appl. Spectrosc.* **38** 778
- [15] Lacan A, Bréon F M, Rosak A, Brachet F, Roucayrol L, Etcheto P, Casteras C, Salaün Y 2010 *Opt. Express* **18** 8311
- [16] Jovanov V, Bunte E, Stiebig H, Knipp D 2011 *Opt. Lett.* **36** 274
- [17] Kauppinen J K, Moffatt D J, Cameron D G, Mantsch H H 1981 *Appl. Opt.* **20** 1866
- [18] Li J Y, Lu D F, Qi Z M 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 077801 (in Chinese) [李金洋, 遯丹凤, 祁志美 2014 物理学报 **63** 077801]
- [19] Wu Y K, Wang W S 2008 *J. Lightwave Technol.* **26** 286

# End-face reflected LiNbO<sub>3</sub> waveguide based stationary miniature Fourier transform spectrometer with two-fold enhanced spectral resolution\*

Li Jin-Yang<sup>1)</sup> Lu Dan-Feng<sup>1)</sup> Qi Zhi-Mei<sup>1)2)†</sup>

1) (State Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

2) (State Key Laboratory of NBC Protection for Civilian, Beijing 102205, China)

( Received 17 July 2014; revised manuscript received 5 December 2014 )

## Abstract

Miniature Fourier transform spectrometer (FTS) has attracted considerable interest because of its important application in spaceborne spectroscopy and as a portable analytical tool for rapid on-site chemical/biochemical detection. In a previous paper, a stationary miniature FTS constructed with an electro-optic (EO) modulator of a LiNbO<sub>3</sub> (LN) waveguide Mach-Zehnder interferometer (MZI) containing push-pull electrodes was demonstrated. This stationary miniature FTS is operated in the near-infrared region with either nonlinear or linear scanning of the modulating voltage. The simple and mirrorless structure renders the device compact, vibration resistant, and cost-effective. However, the spectral resolution of the proposed prototype FTS was not satisfactory due to the limited optical pathlength difference (OPD), thereby limiting the device application. To improve its spectral resolution, the factors affecting the spectral resolution of the LN waveguide-based FTS is investigated in this paper. Findings show that the spectral resolution is inversely proportional to the maximum OPD, which is proportional to the length of the EO modulating region. A simple method for two-fold enhancement of the spectral resolution of the FTS is proposed based on the end-face reflection in LN waveguide interferometer. With the end-face reflection geometry the guided mode can propagate back and forth in the LN waveguide, making the mode passing through the EO modulating region twice and consequently leading to two times enhancement of the OPD. Therefore, the end-face reflection geometry enables to double the maximum OPD of the interferometer without increasing the device size and thus to offer the device a two-fold enhanced spectral resolution according to the equation for FTS resolution. Two prototypes of FTS with and without the end-face reflection structure are prepared using the same commercial LN waveguide EO modulator. The spectral resolutions in terms of the full-width at half maximum (FWHM) at different wavelengths for the two prototypes of FTS are measured using a series of distributed feedback lasers. The FWHM measured at a specific wavelength with the end-face reflection structure is half as large as that obtained without the end-face reflection structure. Experimental results are in excellent agreement with the theoretical data, demonstrating the applicability of the end-face reflection method to the spectral resolution enhancement.

**Keywords:** LiNbO<sub>3</sub> waveguide, miniature Fourier transform spectrometer, spectral resolution, end-face reflection

**PACS:** 42.30.Kq, 07.57.Ty, 42.40.Lx, 78.20.Jq

**DOI:** 10.7498/aps.64.114207

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60978042, 61377064), the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant No. 3131001), the Research Equipment Development Project of Chinese Academy of Sciences (Grant No. YZ201106), and the State Key Laboratory of NBC Protection for Civilian (Grant No. SKLNBC2014-11).

† Corresponding author. E-mail: zhimei-qi@mail.ie.ac.cn