

一种新型的 Tapered 光纤光栅*

李智红 董孝义 赵东晖 盛秋琴
(南开大学现代光学所, 天津 300071)

摘 要 利用耦合模方程对正弦型 Tapered 光纤光栅的反射谱进行了较为详细的计算和分析, 并从实验上进行了验证。利用叠加均匀周期光纤光栅的模板和周期性振幅光栅一次成栅的方法, 获得了具有三个反射峰、中心波长间隔为 0.8 nm 的 Tapered 光纤光栅, 这种光栅具有类似于梳状滤波器的功能, 在多波长光纤激光器等方面有重要应用。

关键词 Tapered 光纤光栅, 耦合模方程, 反射谱。

1 引 言

在光纤光栅技术得到迅猛发展的今天, 随着光纤光栅在通信与传感等领域应用的日益增加, 人们越来越感觉到, 单纯的反射型窄带滤波器(均匀周期光栅)已不能满足需要, 希望通过一种简单易行的方法, 有效地控制光纤光栅反射谱的形状, 使其在更广的范围内具有更高的应用价值。

目前, 除制作啁啾光纤光栅外, 还有一种方法就是制作 Tapered 光栅。这种光栅的特点是其耦合系数沿光栅轴向不再是常数, 而是一个分布(如图1), 通过控制不同的分布达到改变光栅反射谱形状的目的。1994年, Hill 等人曾用两次曝光法制作出类似啁啾光栅的 Tapered 光栅, 并成功地将其应用于光通信系统的色散补偿中^[3]。此外, 人们还发现, 高斯分布的 Tapered 光栅能有力地抑制光栅反射谱的边瓣, 并得到更加满意的色散补偿效果^[4]。

鉴于此, 通过理论计算出各种 Tapered 形状的光纤光栅反射谱对于制作具有不同性能的 Tapered 光栅具有重要的指导意义。本文利用耦合模方程计算了不同频率及相位的正弦函数型 Tapered 光栅的反射谱, 讨论了各参数对反射谱的影响, 并从实验上进行了验证。

2 理论计算

在文献[5]中, 作者曾对线性啁啾光纤光栅的耦合模方程作了较详细的论述。该方程同样可适用于 Tapered 光栅。

如图1所示, 若将入射光波记作前向波 A^+ , 反射波记作后向波 A^- , 光纤光栅长为 L , 不考虑吸收和色散, 有:

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1998-01-19; 收到修改稿日期: 1998-03-20

$$\frac{dA^+}{dz} = \kappa(z) \exp \left[-j \int_0^z B(z') dz' \right] A^-$$

$$\frac{dA^-}{dz} = \kappa(z) \exp \left[j \int_0^z B(z') dz' \right] A^+$$

有一点值得强调的是: $\kappa(z)$ 为耦合系数, 它用来描述由于折射率变化所引入微扰的深度, 同纤芯与包层的折射率差有关, $\kappa(z) \propto \delta n(z)$ 。对普通光纤光栅来说, $\kappa(z)$ 为一常数, 但 Tapered 光栅的 $\kappa(z)$ 是一个函数分布,

$$\kappa(z) = \kappa_0 f(z)$$

$f(z)$ 为归一化函数, 它代表着 $\kappa(z)$ 分布的形状。

$B(z)$ 与折射率变化的周期有关, 对线性啁啾光栅,

$$B(z) = 2\beta - \Omega(z) = 2(\beta_0 + \delta\beta) - (\Omega_0 + Fz/L^2) = 2\delta\beta - Fz/L^2$$

其中, β 为传播常数, $\Omega(z)$ 为局域空间频率, $\beta_0 = \Omega_0/2$ 为中心频率, F 为啁啾系数。因为 Tapered 分布是加在均匀周期光栅上的, 故 $F = 0$ 。结合边界条件:

$$A^+(-L/2) = 1, \quad A^-(L/2) = 0$$

就可确定 z 处的光波。

本文计算了不同频率及相位的正弦分布的 $\kappa(z)$ 对光栅反射谱的影响。引入反射率 R ,

$$R = \frac{|A^-(L/2)|^2}{|A^+(-L/2)|^2}$$

它反映了 Tapered 光栅对不同频率的入射光的反射能力。为比较方便起见, 所有的计算均取 $\kappa_0 L = 5$ 。

令

$$f(z) = [1 + \sin(\omega z + \varphi)]/2$$

解耦合模方程, 可得不同空间频率 ω 的正弦函数分布对光栅反射谱的影响。图 2 所示即为 $\varphi=0$ 不变, $\omega = 1000$ 、5000 和 9000 时, 反射率 R 与 $\delta\beta L$ 分布关系的理论曲线。

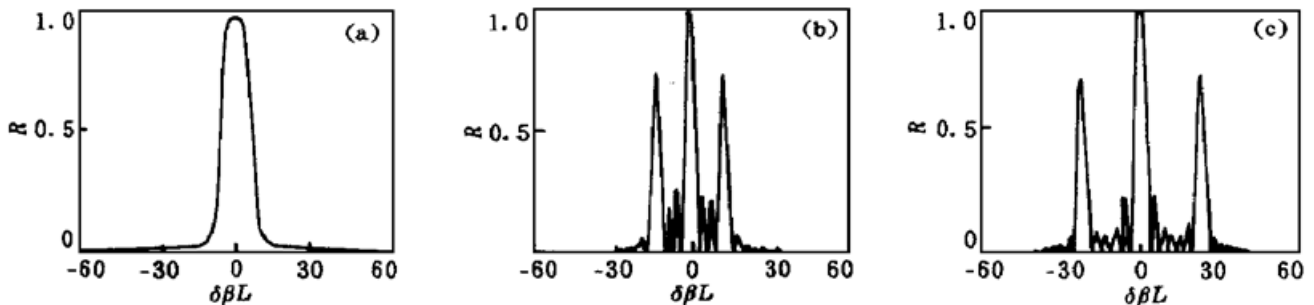


Fig. 2 Reflection spectrum of sinusoidal-tapered grating with the same phase (a) $\omega = 1000$, (b) $\omega = 5000$, (c) $\omega = 9000$

从图2可以看出, 当频率较小时, 反射谱仍为一较窄但很平滑的单峰, 随着频率的增加, 单峰渐渐分裂为三个反射峰, 中间的一个峰反射率最大, 两个边峰反射率较低。当频率进一步增大时, 三个峰不再继续分裂, 但相距却越来越远。在向两边移动的过程中, 每个反射峰

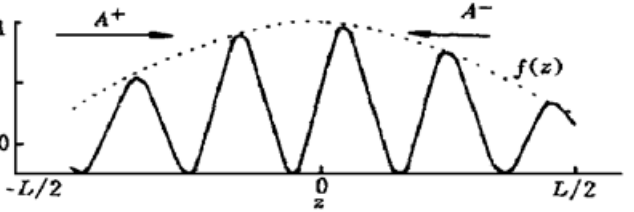


Fig. 1 Reflection change δn of tapered grating versus z axle

的形状都没有明显的改变。中间峰的带宽约为0.36 nm，两个边峰的反射带宽约为0.24 nm。中间峰与边峰间距同函数频率变化的关系如图3所示。从中可以看出它们之间呈现良好的线性关系。

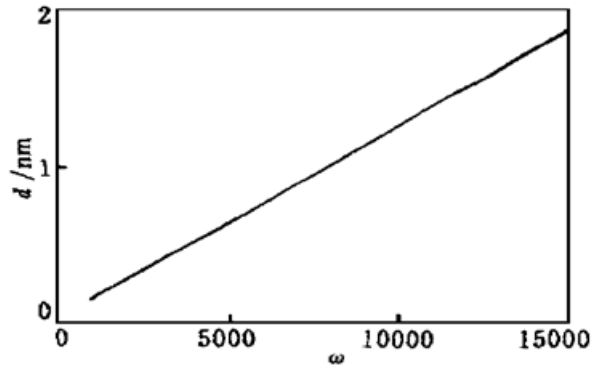


Fig. 3 Relationship between the frequency and the distance from center peak to side peak

3 实验与结果

考虑到制作纯正弦型振幅光栅比较困难，于是，采用了如图4所示的光栅。涂黑的部分完全不透光，光栅的占空比取 $b/a = 0.5$ 。

由频谱分析不难得知，这种方波型的光栅的透过函数可分解为不同频率的正弦波的叠加，且其中与该光栅周期相同的基频正弦波振幅最大，起主要作用，而其余的正弦波分量所起的作用可忽略不计。所以，这种光栅可按正弦型的振幅光栅分析。从后面的实验结果也可看出，这种见解是合理的。



Fig. 4 The rectangular-shaped amplitude diaphragm

实验中使用的振幅光栅长为12 mm，周期分别为0.8 mm 和1 mm，占空比均为0.5(对应的空间频率分别为 $\omega = 7850$ 和 $\omega = 6280$)。将光栅和模板重叠在一起，经能量为270 mJ/脉冲、重复频率为5 Hz 的紫外激光照射几分钟后，即得到图5所示的透射谱。图5(a)是由1 mm 周期的光栅和中心波长为1561 nm 的相位模板相叠加，图5(b)是由0.8 mm 周期的光栅和中心波长为1531 nm 的相位模板叠加得到的。从谱中可看到三个等间距的透射峰，波长间隔约为0.8 nm 和1 nm，与理论计算结果基本相符。

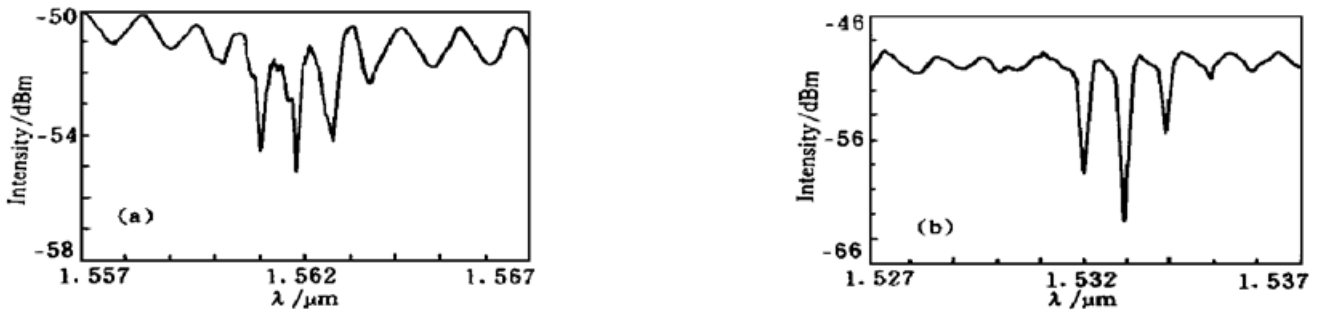


Fig. 5 The Transmission spectrum of Tapered grating (a) $a = 1$ mm, (b) $a = 0.8$ mm

仔细观察两图，在三个尖峰的右侧还可看到一不很明显的矮峰(图上部的平滑起伏部分为背景光)，这个峰的存在可以看作是光栅本身的问题：首先，它是对正弦型光栅的近似；由于方波的傅里叶变换为多个峰，所以制成的光栅也应为多个峰，只是其它峰所对应的傅里叶分量振幅较小而不很明显；另外，因制作精度不够，光栅的周期不很均匀，这些，都将对光栅的透射谱产生一定的影响。

结 论 本文利用耦合模方程对正弦型 Tapered 光纤光栅的反射谱进行了较为详细的计算和分析，并通过实验进行了很好的验证。发现，这种光纤光栅的反射谱与普通均匀周期光栅的反射谱有着很大的不同，反射谱分裂成三个峰，这种类似于梳状滤波器的光栅将会在光纤波分复用通信系统及多波长可调谐光纤激光器等方面发挥作用。

中国科学院半导体所国家光电子工艺中心的葛璜老师和安贵仁老师在光纤光栅的写入实验装置方面提供了帮助, 在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] Ahmed K A, Eggleton B J, Liu H F *et al.*. Simultaneous mode selection and pulse compression of gain-switched pulses from a Fabry-Perot laser using a 40-mm chirped optical fiber grating. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1995, **7**(2) ·158~ 160
- [2] Williams J A R, Bennion I, Sugden K *et al.*. Fiber dispersion compensation using a chirped in-fiber Bragg grating. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(12) ·985~ 987
- [3] Hill K O, Bilodeau F, Malo B *et al.*. Chirped in fiber-gratings for compensation of optical-fiber dispersion. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(17) ·1314~ 1316
- [4] Ouellette F. Dispersion cancellation using linearly chirped Bragg grating filters in optical waveguides. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(10) ·847~ 849
- [5] 李智红, 董孝义, 杨秀峰等. 线性啁啾光纤光栅的数值分析. 光子学报, 1997, **26**(10) ·911~ 914

A New Kind of Tapered Fiber Grating

Li Zhihong Zhao Donghui Sheng Qiuqin Dong Xiaoyi

(*Modern Optics Institute, Nankai University, Tianjin 300071*)

(Received 19 January 1998; revised 20 March 1998)

Abstract Based on couple-modes equations, the reflection spectrum of sinusoidal-Tapered fiber grating was calculated in detail. It has been found that, under different sinusoidal-taper profile, the single peak of periodic grating splits into two or three peaks, This kind of grating is something like a comb-filter, and has good usage in WDM optical fiber communication system, multi-wavelength tunable optical fiber laser etc.

Key words Tapered fiber grating, couple-mode equations, reflection spectrum.