

# 光纤光栅反射谱的放缩特性\*

陶振宁 陈章渊 吴德明

(北京大学电子系区域光纤通信网和新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871)

**摘 要** 利用介质光波导耦合模理论, 证明了弱扰动的光纤光栅具有一个重要特性——放缩特性; 即如果光纤光栅的折射率扰动分布沿光纤轴放大  $\alpha$  倍, 同时扰动强度缩小  $\alpha$  倍, 那么光栅的反射谱就以共振波长为中心在波长轴上缩小  $\alpha$  倍。

**关键词** 光纤光栅, 反射谱, 放缩特性。

在众多波分复用器件中, 光纤光栅以其独特的优点占有重要的地位<sup>[1~4]</sup>。但是, 由简单的等振幅折射率扰动形成的光纤光栅[即光纤的折射率沿轴有  $n = n_0 + n_0 \text{eps} \cos(2\pi z/\Lambda)$  的分布; 其中  $n_0$  是光纤扰动前的折射率,  $\text{eps}$  为小量,  $\Lambda$  为光栅周期], 其反射峰的旁瓣较高, 前沿和后沿的特性较差。为了提高器件的性能, 可用带有适当包络的折射率扰动形成的光栅<sup>[5]</sup>[即  $n = n_0 + n_0 g(z) \cos(2\pi z/\Lambda)$ ]。但包络函数  $g(z)$  的引入使描述光纤光栅中传导光行为的耦合模方程没有解析解, 给光纤光栅的性能分析和设计带来困难。对耦合模方程进行细致分析后, 可发现光纤光栅具有一个重要特性——放缩特性。根据该特性, 带宽要求发生变化时, 可由原光纤光栅直接得到新光纤光栅的各个参数值, 简化了设计。

## 1 理论模型和证明

设单模光纤在  $z = 0$  到  $z = L$  之内有折射率变化:

$$n = n_0 + n_0 g(z) \cos(2\pi z/\Lambda), \quad 0 \leq z \leq L, \quad (1)$$

其中  $n_0$  为光纤芯原折射率。可见折射率沿光纤有一受包络函数  $g(z)$  调制的余弦分布。设可以仅考虑正、反两个模之间的耦合, 且假定  $n_{\text{eff}} = n_0$ , 由马库塞的耦合模理论<sup>[6]</sup>, 耦合模方程为

$$\left. \begin{aligned} dc^+ / dz &= (\omega\kappa/i) g(z) \exp(i\Delta\beta z) c^-, \\ dc^- / dz &= -(\omega\kappa/i) g(z) \exp(-i\Delta\beta z) c^+, \\ c^+(0) &= 1, \quad c^-(L) = 0, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中:  $\Delta\beta = 2\beta - 2\pi/\Lambda$  表示入射光的轴向传播常数,  $c^+$ 、 $c^-$  表示正、反向传播的光的强度,  $\kappa$  为耦合系数。作  $w = z/L$  变换, 方程(2)变为

\* 国家自然科学基金资助项目(69990540-2)。

收稿日期: 1999-04-05; 收到修改稿日期: 1999-05-31

$$\left. \begin{aligned} dc^+ / dw &= L(\omega\kappa/i)g(wL) \exp(i\Delta\beta wL)c^-, \\ dc^- / dw &= -L(\omega\kappa/i)g(wL) \exp(-i\Delta\beta wL)c^+, \\ c^+(0) &= 1, \quad c^-(1) = 0, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

光栅的反射率为  $|c^-(0, \Delta\beta)|^2$ 。设另有一光栅,

$$n = n_0 + n_0(1/\alpha)g(z/\alpha) \cos(2\pi z/\Lambda), \quad 0 \leq z \leq \alpha L, \quad (4)$$

耦合模方程:

$$\left. \begin{aligned} dc^+ / dz &= [\omega'\kappa/(\alpha i)]g(z/\alpha) \exp(i\Delta\beta'z)c^-, \\ dc^- / dz &= -[\omega'\kappa/(\alpha i)]g(z/\alpha) \exp(-i\Delta\beta'z)c^+, \\ c^+(0) &= 1, \quad c^-(\alpha L) = 0, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

作  $w = z/(\alpha L)$  变换, 方程(5)变为

$$\left. \begin{aligned} dc^+ / dw &= \alpha L[\omega'\kappa/(\alpha i)]g(wL) \exp(i\Delta\beta'\alpha wL)c^-, \\ dc^- / dw &= -\alpha L[\omega'\kappa/(\alpha i)]g(wL) \exp(-i\Delta\beta'\alpha wL)c^+, \\ c^+(0) &= 1, \quad c^-(1) = 0, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

光栅的反射率为  $|c^-(0, \Delta\beta')|^2$ 。比较上述两种情况, 可以发现如果  $\Delta\beta' = \Delta\beta/\alpha$ , 并近似认为  $\omega'\kappa = \omega\kappa$  (在  $\Delta\beta$  较小时成立, 而光纤光栅的反射特性通常是在  $\Delta\beta$  较小的情况下考虑的), 那么两者的方程与边条件完全一样, 因此反射率一样, 也就是说如果在第一种情况下反射谱记为  $R(\Delta\beta)$ , 那么在第二种情况下反射谱为  $R(\alpha\Delta\beta')$ 。这就证明了光纤光栅的放缩特性。

## 2 实例验证

首先以均匀光栅为例验证上述结论。均匀光栅的反射谱为<sup>[7]</sup>

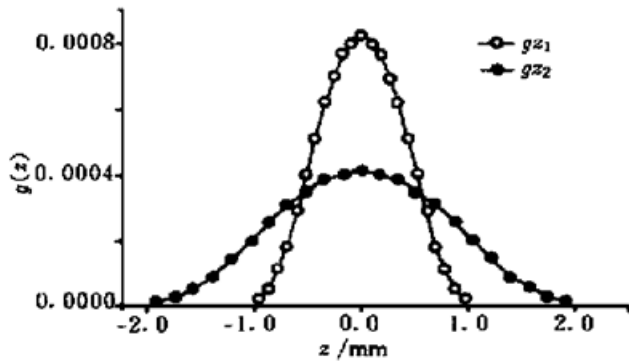
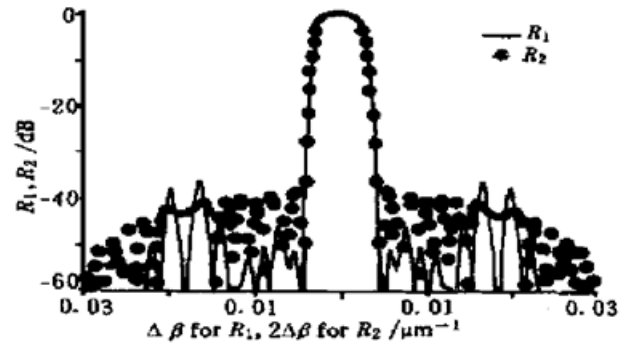
$$R(\Delta\beta) = \left| \frac{-\kappa \sinh \sqrt{\kappa^2 - \Delta\beta^2}L}{\Delta\beta \sinh \sqrt{\kappa^2 - \Delta\beta^2}L + i \sqrt{\kappa^2 - \Delta\beta^2} \cosh \sqrt{\kappa^2 - \Delta\beta^2}L} \right|^2, \quad (7)$$

将光栅长度放大  $\alpha$  倍, 强度缩小  $\alpha$  倍, 新的反射谱为

$$\begin{aligned} R'(\Delta\beta') &= \left| \frac{-(\kappa/\alpha) \sinh \sqrt{(\kappa/\alpha)^2 - \Delta\beta'^2}\alpha L}{\Delta\beta' \sinh \sqrt{(\kappa/\alpha)^2 - \Delta\beta'^2}\alpha L + i \sqrt{(\kappa/\alpha)^2 - \Delta\beta'^2} \cosh \sqrt{(\kappa/\alpha)^2 - \Delta\beta'^2}\alpha L} \right|^2 = \\ &= \left| \frac{-\kappa \sinh \sqrt{\kappa^2 - (\alpha\Delta\beta')^2}L}{(\alpha\Delta\beta') \sinh \sqrt{\kappa^2 - (\alpha\Delta\beta')^2}L + i \sqrt{\kappa^2 - (\alpha\Delta\beta')^2} \cosh \sqrt{\kappa^2 - (\alpha\Delta\beta')^2}L} \right|^2 = \\ &R(\alpha\Delta\beta'). \end{aligned} \quad (8)$$

对任意的包络函数  $g(z)$ , 耦合模方程只能求数值解, 下面给出数值解的结果。求解的基本方法是用阶梯函数近似代替  $g(z)$ , 各阶梯的取值由 CAD 程序设计。图 1 给出了包络函数  $g(z)$  的数值  $gz_1$  和  $gz_2$ , 对应的  $\alpha$  值为 2。图 2 给出了数值求解的结果, 其中  $R_1$  对应  $gz_1$ ,  $R_2$  对应  $gz_2$ 。为了便于比较, 图中  $R_2$  的横坐标放大了两倍, 为  $2\Delta\beta$ 。从图中可以很明显地看出反射谱的放缩特性。由于数值计算带来的误差, 反射谱中 -40 dB 以下部分放缩特性被破坏。

**结 论** 如果光纤光栅甲有  $n = n_0 + n_0g(z) \cos(2\pi z/\Lambda)$ ,  $0 \leq z \leq L$  的折射率扰动, 且其反射谱为  $R(\Delta\beta)$ , 那么折射率扰动为  $n = n_0 + n_0(1/\alpha)g(z/\alpha) \cos(2\pi z/\Lambda)$ ,  $0 \leq z \leq \alpha L$  的光纤光栅

Fig. 1 Apodizing function  $g^{z_1}$  and  $g^{z_2}$ Fig. 2 Reflection spectra  $R_1$  and  $R_2$  whose horizontal axis is expanded two times

乙的反射谱为  $R(\alpha\Delta\beta)$ 。本结论的意义在于如果找到满足设计要求的折射率扰动函数  $g(z)$ ，那么当设计要求中带宽要求发生变化时，新的折射率扰动函数可以根据本特性方便地得到。

### 参 考 文 献

- [1] Limberger H G, Fonjallaz P Y, Salathe R P. Spectral characterisation of photoinduced high efficient Bragg gratings in standard telecommunications fibers. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(1) : 47~ 49
- [2] Lam D K W, Garside B K. Characterization of single-mode optical fiber filters. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(3) : 440~ 445
- [3] Hill K O. Aperiodic distributed-parameter waveguides for integrated optics. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(8) : 1853~ 1856
- [4] Garthe D, Epworth R E, Lee W S *et al.*. Adjustable dispersion equaliser for 10 and 20 Gbits/s over distance up to 160 Km. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(25) : 2159~ 2160
- [5] Matsuhara M, Hill K O. Optical-waveguide band-rejection filters: Design. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(12) : 2886~ 2888
- [6] 马库塞 D 著. 刘弘度译. 介质光波导理论. 北京: 人民邮电出版社, 1982.
- [7] Kogelnik H. Theory of Optical Waveguides. In: Tamir T Ed. *Guided-Wave Optoelectronics*. New York: Springer-Verlag, 1990.

## Narrowing and Broadening of FBG Reflection Spectra

Tao Zhenning      Chen Zhangyuan      Wu Deming

(National Laboratory on Local Optic-Fiber Communication Networks  
and Advanced Optical Communication Systems, Department of Electronics,  
Peking University, Beijing 100871)

(Received 5 April 1999; revised 31 May 1999)

**Abstract** An important property of apodized weak fiber Bragg grating (FBG) is demonstrated. It shows that if the reflection spectra  $R(\Delta\beta)$  of an apodized weak FBG is needed to be narrowed to '1/n', i. e. from  $R(\Delta\beta)$  to  $R(n\Delta\beta)$ , then the apodizing function  $g(z)$  should be broadened 'n' times, i. e. from  $g(z)$   $0 < z < L$  to  $g(z/n)/n$ ,  $0 < z < nL$ . Two examples are given to validate this property.

**Key words** fiber Bragg grating, reflection spectra, narrow and broaden.