

文章编号: 0253-2239(2001)04-476-04

# 含有光纤光栅的萨尼亚克环的透射特性分析

刘 宁 刘颂豪 廖常俊 徐文成 郭 旗

(华南师范大学量子电子学研究所, 广州 510063)

**摘要:** 详细分析了由光纤光栅和萨尼亚克(Sagnac)环构成的透射滤波器的特性。给出了在均匀光纤光栅的情况下,该滤波器透过率的解析公式。结果表明该滤波器的透射光谱是余弦函数调制后的光纤光栅反射光谱。当光纤光栅是“强”耦合时,该滤波器可以构成多通带滤波器。而当光纤光栅为“弱”耦合时,该滤波器可以构成单通带滤波器。这些滤波器可应用于现代光纤通信系统中。

**关键词:** 滤波器; 光纤光栅; 光纤通信

中图分类号: TB851<sup>+</sup>.7 文献标识码: A

## 1 引 言

窄带宽滤波器在现代光纤通信中具有非常重要的应用,它可以作为带通滤波器、窄带宽隔离器和波长选择器等。特别是对于波分复用(WDM)或密集波分复用(DWDM)系统,窄带滤波器是关键元件之一。虽然目前已可以为波分复用系统制作各种带通滤波器,但很难取得理想效果。光纤光栅由于具有窄的反射光谱带宽以及与光纤兼容的特性,因而被作为滤波或选频等器件在光纤通信中广泛采用。然而这需要将光纤光栅的反射特性转变为透射特性。由于光纤光栅构成的窄带宽透射滤波器<sup>[1~5]</sup>通常采用的是迈克耳孙/马赫-曾德尔干涉仪结构或法布里-珀罗腔结构。由光纤光栅和萨尼亚克环构成窄带宽透射滤波器是由 Hill<sup>[1]</sup>等人提出来的,但对这种滤波器却没有进行过详细的理论分析。本文对光纤光栅和萨尼亚克环构成的窄带宽透射滤波的特性进行了详细分析,并给出了均匀光纤光栅构成的这种滤波器的透过率的解析公式。这对于清楚地认识这种滤波器以及这种滤波器的设计和应用是十分重要的。结果表明这种滤波器的透过率是余弦函数调制后的光纤光栅的反射谱,而调制函数与光纤光栅在萨尼亚克环中的位置有关,光纤光栅越偏离萨尼亚克环的中心位置,调制的频率越高。根据这些特性,我们可以将这种滤波器设计成多通或单通滤波器。当光纤光栅是“强”耦合时,该滤波器可以构成多通带滤波器;而当光纤光栅为“弱”耦合时,该滤波器可以构成单通带滤波器,并且其带宽小于光纤光

栅反射光谱的带宽。但当光纤光栅是“弱”耦合时,该滤波器的透过率要低一些,对此本文给出了一种通过优化耦合器的分束比和光纤光栅在萨尼亚克环中的位置,将该滤波器的透过率最大化的方法。对于“强”耦合光纤光栅,本文还提出了在萨尼亚克环中通过串联多个光纤光栅,以提高滤波器通道数量的方法。

虽然由光纤光栅和萨尼亚克环构成的透射滤波器与光纤光栅构成的迈克耳孙干涉仪<sup>[5]</sup>型透射滤波器类似,但它有自己明显的优点:它只需一个光纤光栅,从而克服了需要制作两个完全相同的光纤光栅的困难。

## 2 理论分析

透射滤波器结构如图 1 所示。它由一个  $2 \times 2$  耦合器和一个光纤光栅组成。滤波器的输入端为 1,输出端为 2。光纤光栅连接在耦合器的另外两端,其中,光纤光栅的一端离开耦合器端口 3 的距离为  $L_1$ ,另一端离开耦合器端口 4 的距离为  $L_2$ 。对于一个均匀的光纤光栅,由光纤光栅理论可知光波通过一个光纤光栅后,其透射光和反射光的关系为<sup>[6]</sup>

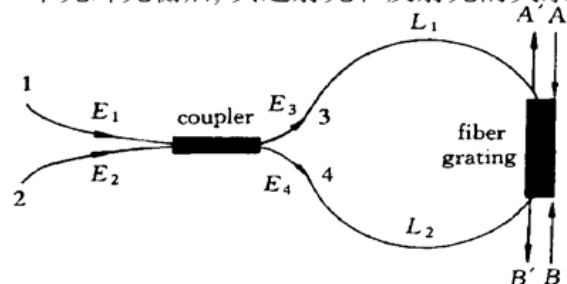


Fig. 1 Schematic diagram of the transmission filter

$$\begin{bmatrix} A' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & t \\ t & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中

$$r = \frac{i\kappa \sinh\left[\sqrt{\kappa^2 - \delta^2}L\right]}{\sqrt{\kappa^2 - \delta^2} \cosh\left[\sqrt{\kappa^2 - \delta^2}L\right] - i\delta \sinh\left[\sqrt{\kappa^2 - \delta^2}L\right]}, \quad (2)$$

$$t = \frac{\sqrt{\kappa^2 - \delta^2}}{\sqrt{\kappa^2 - \delta^2} \cosh\left[\sqrt{\kappa^2 - \delta^2}L\right] - i\delta \sinh\left[\sqrt{\kappa^2 - \delta^2}L\right]}, \quad (3)$$

$\kappa$  为光纤光栅的耦合系数,  $\delta = 2\pi n_{\text{eff}} \left[ \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_D} \right]$  为失调参数 ( $n_{\text{eff}}$  为光纤传导模的有效折射率,  $\lambda$  为入射光波长,  $\lambda_D$  为光纤光栅的“设计布拉格波长”),  $L$

$$T = \frac{\sinh\left[\sqrt{\kappa^2 - \delta^2}L\right] \sin(2\alpha) \cos[k(L_2 - L_1)] - \sqrt{1 - (\delta/\kappa)^2} \cos(2\alpha)}{\cosh^2\left[\sqrt{\kappa^2 - \delta^2}L\right] - (\delta/\kappa)^2}, \quad (5)$$

其中,  $k = 2\pi n_{\text{eff}}/\lambda$ 。

对于一个 3 dB 耦合器 ( $\cos\alpha = \sqrt{2}/2$ ), (5) 式变为

$$T = \frac{\sinh^2\left[\sqrt{\kappa^2 - \delta^2}L\right] \cos^2[k(L_2 - L_1)]}{\cosh^2\left[\sqrt{\kappa^2 - \delta^2}L\right] - (\delta/\kappa)^2}. \quad (6)$$

由(6)式可以看出滤波器的透过谱将是余弦函数调制后的光纤光栅的反射谱, 其中调制函数与光纤光栅在萨尼亚克环中的位置有关。当光纤光栅位于萨尼亚克环的中心时, 滤波器的透过谱即是光纤光栅的反射谱; 而当光纤光栅偏离萨尼亚克环的中心位置时, 滤波器将表现为光纤光栅反射谱内的多个干涉峰结构。(5)式和(6)式对清楚地认识由光纤光栅和萨尼亚克环构成的透射滤波器的特性以及这种滤波器的设计和应用具有重要的意义。

### 2.1 “强”耦合光纤光栅

当光纤光栅为“强”耦合<sup>[6]</sup>(即  $\kappa$  较大)时, 光纤光栅有较宽的反射光谱带宽, 这时通过设定光纤光栅在萨尼亚克环中的位置, 可以将滤波器设计成具有不同通道带宽的多通带滤波器, 如图 2 所示。其中图 2(b) 中光纤光栅偏离萨尼亚克环的中心位置是图 2(a) 的两倍。图中透射峰的包络即是光纤光栅的反射谱。由图 2 可以看出通过改变光纤光栅在萨尼亚克环中的位置即可增加或减少滤波器通道的数量。实际上, 透射峰是耦合器两输出端的光波经过光纤光栅两端反射后, 在耦合器干涉形成的结果(类似于一个迈克耳孙干涉仪), 因而它表现出正弦函数的响应特性; 在光纤光栅的反射谱内形成均匀的干涉峰,

为光纤光栅的长度,  $A$  和  $B$  分别为光纤光栅两侧光场的慢变振幅近似。

由光纤耦合器理论可知<sup>[7]</sup>, 耦合器输入光场和输出光场的关系为

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & i\sin\alpha \\ i\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中,  $E_1$  和  $E_2$  为耦合器端口 1 和 2 的输入光场,  $E_3$  和  $E_4$  为耦合器端口 3 和 4 的输出光场,  $\alpha = Cl_c$  ( $C$  为耦合器的耦合系数,  $l_c$  为耦合长度)。

当入射光波从耦合器端口 1 输入时, 由(1)式和(4)式并考虑到光波在光纤  $L_1$  和  $L_2$  中产生的相移, 可以得到从耦合器端口 2 的输出光强, 即滤波器的透过率为

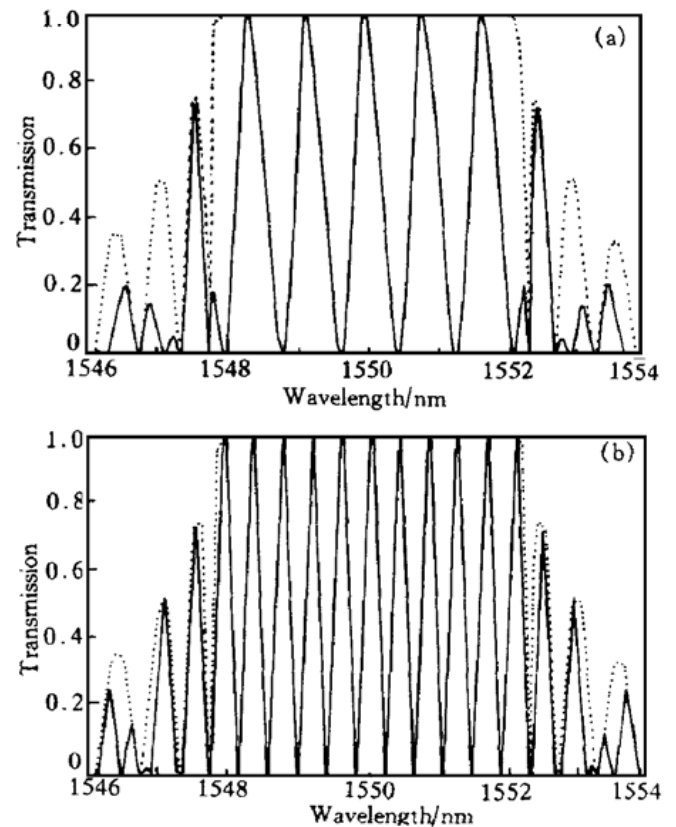


Fig. 2 (a) Solid: The multi-passband transmission spectrum of the Sagnac loop (the splitting ratio of the coupler is 50/50) with one “strong” coupling uniform fiber grating ( $\kappa L = 8$ ,  $\lambda_D = 1550$  nm). Dot: the reflectivity of the same fiber grating. (b) Solid: the transmission spectrum of the filter when the deviation of the fiber grating from the center of the Sagnac loop is twice that of Fig. 2(a)

其中各个透射峰的宽度以及各透射峰之间的间距都是相同的。因此这种滤波器可以构成非常理想的多

通道滤波器, 其中每个通道的半宽度(FWHM)  $\Delta\lambda_w$  以及通道之间的间距  $\Delta\lambda_s$  分别为

$$\left. \begin{aligned} \Delta\lambda_w &= \frac{\lambda_D^2}{4n_{\text{eff}}(L_2 - L_1)}, \\ \Delta\lambda_s &= \frac{\lambda_D^2}{2n_{\text{eff}}(L_2 - L_1)}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

对于“强”耦合光纤光栅, 它反射谱的带宽为<sup>[6]</sup>

$$\Delta\lambda_0 = \frac{\kappa\lambda_D^2}{\pi n_{\text{eff}}}, \quad (8)$$

所以滤波器通道的个数(奇整数)近似为

$$N \approx \text{odd-integer} \left\lfloor \frac{2\kappa(L_2 - L_1)}{\pi} \right\rfloor. \quad (9)$$

从以上结果可以看出, 这种滤波器设计灵活, 可以非常容易地实现不同通道间隔的多通道滤波器, 因此在波分复用、特别是密集波分复用光纤通信系统中有着广泛的应用前景。

然而, 仅当光纤光栅为均匀光纤光栅时滤波器才会具有上述均匀分布的多通道特性, 并且这种均匀分布的通道也仅限制在光纤光栅的反射光谱带宽之内。虽然通过改变光纤光栅在萨尼亚克环中的位置可以增加通道的数量(如图 2 所示), 但通信系统对信道之间的间隔有一定的要求, 所以不能采用改变光纤光栅位置的方法无限增加通道的数量(因为即使是“强”耦合光纤光栅, 其反射光谱的带宽也不可能达到很宽)。对此我们提出采用在萨尼亚克环中串联多个中心波长稍有差距的光纤光栅的方法, 提高滤波器通道的数量。

图 3 是在萨尼亚克环中串联两个中心波长稍有不同的光纤光栅后, 滤波器透射光谱的数值计算结果。由图 3 可以看出, 在保证了通道之间的间距后, 滤波器通道的数量增加了一倍。

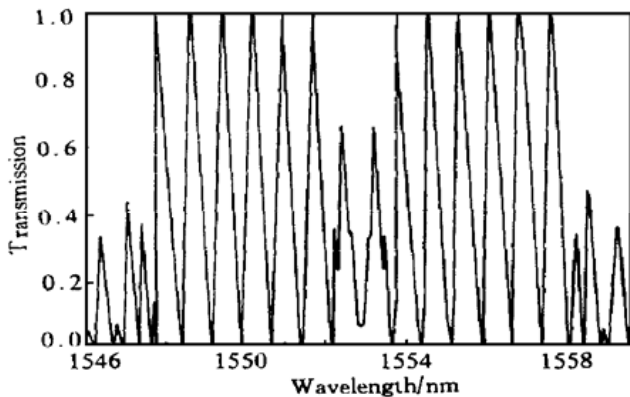


Fig. 3 The transmission spectrum of the Sagnac loop (the splitting ratio of the coupler is 50/50) with two different fiber gratings ( $\kappa_1 L_1 = 8$ ,  $\kappa_2 L_2 = 8$ ,  $\lambda_{D1} = 1550$  nm,  $\lambda_{D2} = 1555.8$  nm) cascaded in the Sagnac loop

## 2.2 “弱”耦合光纤光栅

当光纤光栅为“弱”耦合( $\kappa$ 较小)时, 由于光纤光栅反射谱的带宽较窄, 这时滤波器可以构成单通道滤波器, 如图 4 所示。

由图 4 可以看出滤波器的带宽比光纤光栅的带宽还要窄, 因此可以获得非常窄的单通道滤波器。由于光纤光栅是“弱”耦合, 所以滤波器的透过率要相对低一些。对此, 我们提出一种将滤波器透过率最大化的方法。由(5)式可以得到, 当光纤光栅在萨尼亚克环中的位置和耦合器的分束比同时满足条件

$$\left. \begin{aligned} \frac{2\pi}{\lambda_D}(L_2 - L_1) &= (2n + 1)\pi, \\ \tan(2\alpha) &= \sinh(\kappa L). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

时, 滤波器在中心波长处的透过率将最大化为 1。其中  $n$  为整数。

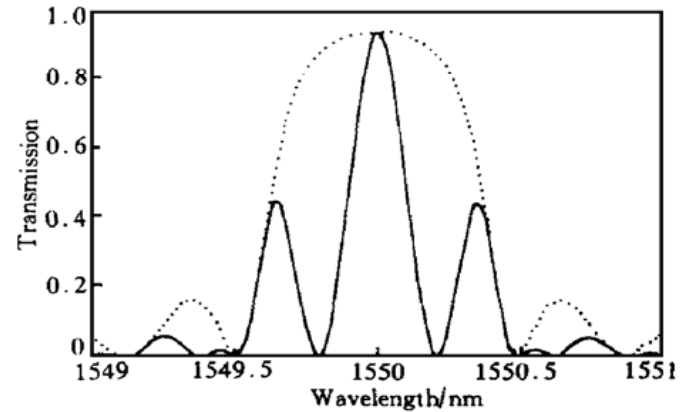


Fig. 4 Solid: The single passband transmission spectrum of the Sagnac loop (the splitting ratio of the coupler is 50/50) with one “weak” coupling uniform fiber gratings ( $\kappa L = 2$ ,  $\lambda_D = 1550$  nm). Dot: the reflectivity of the same uniform fiber grating

图 5 是满足(10)式的滤波器的透射光谱。比较图 4 和图 5 可以看出, 滤波器的透过率最大化后的特性要比没经过最大化的滤波器好。(10)式表明,

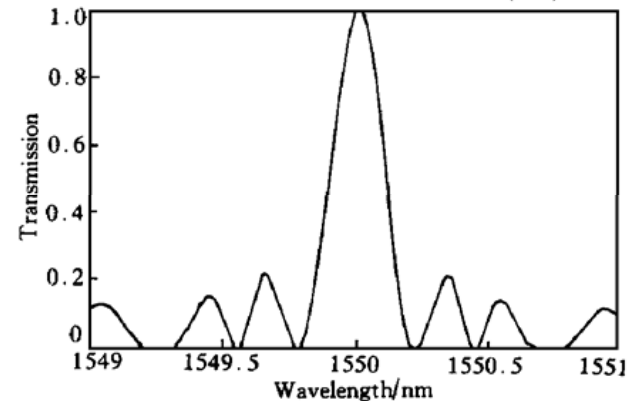


Fig. 5 The transmission spectrum of the filter after optimization of the position of the fiber grating (same as Fig. 4) in the Sagnac loop and the splitting ratio of the coupler

在这种条件下, 光纤光栅在萨尼亚克环中的位置将与光纤光栅的“设计”波长有关, 而耦合器的分束比也将由光纤光栅的特性所决定。由图 5 可以看出, 当光纤光栅为“弱”耦合时, 可以得到带宽非常窄的单通带滤波器, 因此它在波分复用、特别是密集波分复用光纤通信系统中也有着广泛的用途。

**结论** 本文详细分析了由光纤光栅和萨尼亚克环构成的透射滤波器的特性, 给出了在均匀光纤光栅的情况下, 该滤波器透过率的解析公式, 结果表明该滤波器的透射光谱是余弦函数调制后的光纤光栅反射光谱。当光纤光栅为“强”耦合时, 该滤波器可以构成多通带滤波器; 而当光纤光栅为“弱”耦合时, 该滤波器可以构成单通带滤波器。这两种滤波器在波分复用、特别是密集波分复用光纤通信系统中都有着广泛的用途。

本文还提出了在萨尼亚克环中串联多个光纤光栅使多通道滤波器的通道数量增加, 以及通过优化光纤光栅在萨尼亚克环中的位置和优化耦合器的分

束比使单通道滤波器透过率最大化的方法。

### 参 考 文 献

- [1] Hill K O, Johnson D C, Bilodeau F *et al.*. Narrow-bandwidth optical waveguide transmission filters. *Electron. Lett.*, 1987, **23**(8): 465~ 466
- [2] Bilodeau F, Hill K O, Malo B *et al.*. High return-loss narrowband all-fiber bandpass Bragg transmission filter. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1994, **6**(1): 80~ 82
- [3] Gu X J. Wavelength-division multiplexing isolation fiber and light source using cascaded long-period fiber grating. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(7): 509~ 510
- [4] Chen L R, Cooper D J F, Smith P W E. Transmission filters with multiple flattened passbands based on chirped Moiré gratings. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1998, **10**(9): 1283~ 1285
- [5] Kashyap R. A new class of fibre grating based band-pass filters: The asymmetric interferometer. *Opt. Commun.*, 1998, **153**(1~ 3): 14~ 18
- [6] Erdogan T. Fiber grating spectra. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~ 1294
- [7] Birks T A, Morkel P. Jones calculus analysis of single-mode fiber Sagnac reflector. *Appl. Opt.*, 1998, **27**(15): 3107~ 3113

## Transmission Characteristics of Sagnac Loop with Fiber Bragg Gratings Inserted

Liu Ning Liu Songhao Liao Changjun Xu Wencheng Guo Qi

(Institute of Quantum Electronics, South China Normal University, Guangzhou 510631)

(Received 27 September 1999; revised 10 January 2000)

**Abstract:** The transmission characteristics of the filter composed of a Sagnac loop and fiber Bragg gratings are studied in detail. The analytical results are given for the uniformed fiber grating. It was found that the transmission spectrum of the filter is the cosine function modulated reflection spectrum of the fiber grating. When the fiber grating is “strong” coupling, a multi-passband filter can be constructed. When the fiber grating is “weak” coupling, a single-passband filter can be constructed. These filters can be used in modern optical fiber communications.

**Key words:** filters; fiber grating; optical communication