

基于单个光纤光栅的 Sagnac 干涉仪的 理论与实验研究*

舒学文¹⁾ 黄德修¹⁾ 邓桂华²⁾ 施 伟²⁾ 江 山²⁾

¹⁾ 华中理工大学光电子工程系, 武汉 430074)

²⁾ 武汉邮电科学院固体器件研究所, 武汉 430074)

(1999 年 12 月 5 日收到, 2000 年 4 月 4 日收到修改稿)

提出了一种结构新颖的 Sagnac 干涉仪, 分析计算了所含光纤光栅分别为均匀 Bragg 光栅和线性啁啾光栅时的透射响应, 得到了均匀光栅 Sagnac 环的解析解, 发现含均匀光栅时可得到间隔均匀的通带结构, 而含啁啾光纤光栅时只能得到间隔非均匀的通带结构. 这两种结构都可能具有应用价值, 前者可用在密集波分复用系统中, 后者可用在光纤传感领域中. 实验制作了两种通带间隔不同的、通带数分别为 8 和 16 的多通带滤波器, 实验证实了理论计算得到的结果.

关键词: 光纤光栅, Sagnac 干涉仪, 光学滤波器

PACC: 4281, 4280F, 4280B

1 引 言

光纤光栅是近年来在光纤技术领域内研究非常活跃的一种新颖器件, 由于它制作在光纤芯区与光纤完全兼容、反射和透射特性优良、附加损耗小、体积小及成本低等突出优点, 正在被广泛应用在光纤通信和光纤传感领域中. 光纤光栅一个非常重要的应用方面便是在一些干涉仪结构中替代传统的光学反射镜构成一些全光纤型器件, 例如 Bilodeau 等人报道了将光纤光栅写在光纤 Mach-Zehnder 干涉仪的两个平衡臂中构成的密集波分复用/解复用器^[1], Kashyap 报道了具有梳状滤波效果的光纤光栅型 Michelson 干涉仪^[2], Koo 等人报道了叠写两个啁啾光纤光栅构成的非均匀自由谱宽的 FP 干涉型传感器^[3]等等. 在已报道的这类器件中, 大多数情况下需要写入两个完全一样光纤光栅以期获得最佳性能, 否则两个光栅光谱特性的差异可能导致器件性能的严重劣化^[2,4]. 这样就要求光纤光栅在制作过程中必须有较为复杂精密的控制, 即使先进的光纤光栅写入技术可以制作出完全类似的光纤光栅, 两个光栅本身的性能随使用时间的变化及环境

的影响也可能导致它们光谱特性的差异, 这同时进一步增加了器件封装的复杂性.

本文报道一种将单个光纤光栅写在 Sagnac 环中构成的新颖的全光纤型器件. 尽管这种器件的概念最初由 Hill 等人提出^[5], 但一直缺乏较深入地理论分析和实验研究. 本文较详细讨论了将两类不同的光纤光栅分别写入环中的情形, 得到了一些在理论上有价值的结论, 同时从实验上验证了理论结果. 理论和实验研究表明这种器件与前面所提及的一些干涉结构具有很多相似特性, 但本文所讨论的器件由于只需写入单个光纤光栅(实际起到了两个光纤光栅的作用)因而使制作简单、成本降低.

2 理论分析与讨论

2.1 理论模型

本文报道的 Sagnac 干涉仪结构如图 1 所示, 光波从端口 1 输入, 经过光纤耦合器分成两路, 遇到光纤光栅后, 每路光波都被部分或全部被光纤光栅反射, 最后各路光波在耦合器的两个端口相干叠加, 端口 1 可观察到反射波, 端口 2 可观察到透射波. 在图

* 国家自然科学基金(批准号 69587003)资助的课题.

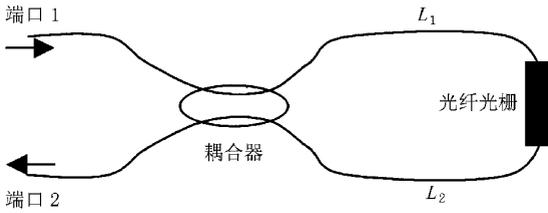


图 1 环中含有一个光纤光栅的全光纤 Sagnac 干涉仪

1 的结构中所写入的光纤光栅可以是周期均匀的光栅, 也可是周期变化的光纤光栅. 对这种器件, 可用传输矩阵法来进行一般性的理论计算和分析. 在不考虑损耗的情况下, 光纤耦合器的和光纤的传输矩阵分别可写为

$$\begin{vmatrix} \sqrt{1-K} & j\sqrt{K} \\ j\sqrt{K} & \sqrt{1-K} \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} \exp(j\beta L_i) & 0 \\ 0 & \exp(-j\beta L_i) \end{vmatrix}, \quad (1)$$

其中 K 是光纤耦合器的耦合系数, $L_i (i=1, 2)$ 是图

$$T = \frac{[(1-2K)\sqrt{1-\sigma^2/\kappa^2} + 2\sqrt{K(1-K)}\sin(\sqrt{\kappa^2-\sigma^2}L_g)\cos(\beta\Delta L)]^2}{\cosh^2(\sqrt{\kappa^2-\sigma^2}L_g) - \sigma^2/\kappa^2}, \quad (3)$$

其中 $\Delta L = L_1 - L_2$, L_g 为光纤光栅的长度. 对于使用 3dB 耦合器的情形, $K=0.5$, 上式进一步简化为

$$T = \frac{\sinh^2(\sqrt{\kappa^2-\sigma^2}L_g)}{\cosh^2(\sqrt{\kappa^2-\sigma^2}L_g) - \sigma^2/\kappa^2} \cos^2(\beta\Delta L). \quad (4)$$

从 (4) 式看出, 如果 $\Delta L = 0$, 则透射率正好是均匀 Bragg 光纤光栅的反射谱^[6], 如果 $\Delta L \neq 0$, 则环的透射率恰好为光栅反射谱包络受到余弦调制的结果. 这一结论很有意义, 因为在两臂不等长的情况下, 原本单一的较宽的通带光谱将被等分为许多窄通带光谱, 可能通过这种办法获得一种梳状滤波效果. 图 2 是针对密集波分复用 (DWDM) 设计的一系列梳状滤波器, 所设计的光栅的折变 $\Delta n = 7.6 \times 10^{-3}$, 长度 $L_g = 2\text{mm}$, 周期 $\Lambda = 536\text{nm}$, 有效折射率 $n_e = 1.452$, 其中图 2(a) 显示了这个光纤光栅的反射谱, 这也恰是 $\Delta L = 0$ 时的 Sagnac 环的透射谱, 图 2(a)(b) 和 (c) 则分别是设计 $\Delta L = 1\text{mm}$, 2.1mm , 4.2mm 得到的 Sagnac 环的透射谱, 其中的通带间隔分别为 $\Delta\lambda = 0.8\text{nm}$, 0.4nm , 0.2nm , 将它们与图 2(a) 比较可看出这些通带都恰好位于光纤光栅反射谱的包络内. 这类等间距的滤波器可能在密集波分复用中很有用途, 例如图 2(b) 中的滤波器可同时为 8 个间隔 0.8nm 的信道提供滤波效果, 这类滤波器

1 中两段光纤的长度, β 为光纤中的模式传播常数. 对于一般情况, 光纤光栅应分为很多小段, 将每小段视为均匀光栅, 然后把各小段的传输矩阵连乘, 设各小段的长度为 ΔZ , 其传输矩阵可写为^[6]

$$\begin{vmatrix} \cosh(\gamma\Delta Z) - j\frac{\sigma}{\gamma}\sin(\gamma\Delta Z) & -j\frac{\kappa}{\gamma}\sin(\gamma\Delta Z) \\ j\frac{\kappa}{\gamma}\sin(\gamma\Delta Z) & \cosh(\gamma\Delta Z) + j\frac{\sigma}{\gamma}\sin(\gamma\Delta Z) \end{vmatrix}, \quad (2)$$

其中 $\gamma = \sqrt{\kappa^2 - \sigma^2}$, κ 和 σ 分别称为这一小段上的交流和直流耦合系数^[6]. 将以上各矩阵结合起来^[7], 就可方便地对包含各类光纤光栅的 Sagnac 干涉仪进行数值法求解.

2.2 含均匀 Bragg 光栅的 Sagnac 环

虽然一般情形下, 这种干涉仪没有解析解, 但是对于所含光栅为均匀 Bragg 光栅时, 可导出其解析解来, 其透射率可表达为

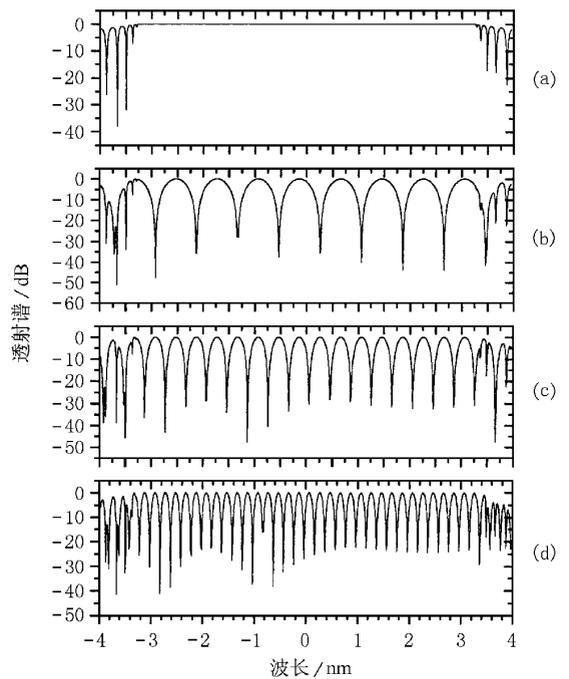


图 2 一个均匀 Bragg 光栅的反射谱 (a) 及其构成的 Sagnac 环的透射谱, 其中设计了不同的通道间隔 (b) $\Delta\lambda = 0.8\text{nm}$ (c) $\Delta\lambda = 0.4\text{nm}$ (d) $\Delta\lambda = 0.2\text{nm}$

也可能作为反馈元件用于制作多波长激光器, 而后者将是密集波分复用系统中非常重要的一类光源. 这种滤波器的通道间隔很容易设计成任意所需的波

长间隔,事实上,从(4)式很容易导出自由谱宽,

$$FSR = \frac{c}{2n_c \Delta L}, \quad (5)$$

c 为真空中的光速。(5)式表明对于均匀光纤光栅的情形,自由谱宽仅与两臂之差 ΔL 有关,而与光纤光栅本身的长度无关.对所需的通道间隔 $\Delta\lambda$ 只要使 ΔL 满足下式即可:

$$\Delta L = \frac{\lambda^2}{2n_c \Delta\lambda}. \quad (6)$$

如果耦合器的耦合系数 K 不为 0.5,则会导致峰值透射率降低和条纹对比度的下降,图 3 比较了其他参数完全一致而 K 分别为 0.5 和 0.75 时这类 Sagnac 环的透射率,所用光纤光栅参数为 $\Delta n = 1 \times 10^{-3}$, $L_g = 4\text{mm}$, $\Delta L = 4.2\text{mm}$.

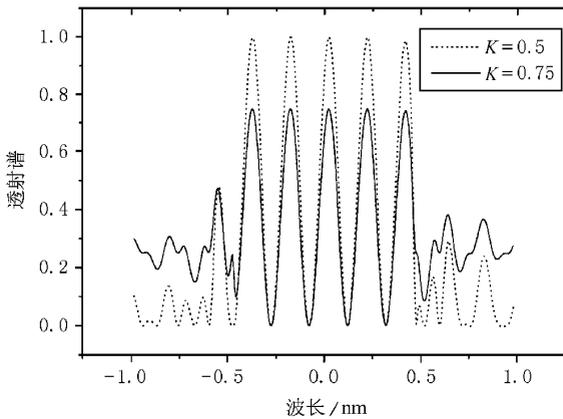


图 3 耦合器的耦合系数分别为 $K=0.5$ 和 0.75 时 Sagnac 环的透射谱 $\Delta n = 1 \times 10^{-3}$, $L_g = 4\text{mm}$, $\Delta L = 4.2\text{mm}$

2.3 含线性啁啾光栅的 Sagnac 环

线性啁啾光纤光栅是指光栅周期沿光栅长度方向线性变化的一类光纤光栅,由于光栅每个位置处周期的差异,导致每处的本地 Bragg 波长不一样.如果把这种光纤光栅写入到 Sagnac 环中,则会出现通带间隔不均等的现象.图 4 是采用 $L_g = 5\text{mm}$, $\Delta n = 8.8 \times 10^{-4}$, 啁啾系数 $C = 2.4\text{nm/cm}$ (方向由 L_1 端看去)的线性啁啾光纤光栅制作在环中不同位置,同时采用 3dB 耦合器时所计算得到的透射谱.为了方便比较,在每个图中都添加了所用线性啁啾光纤光栅的反射谱(虚线包络).从图 4(a)看到,即使 $\Delta L = 0$,透射谱中的各个峰也不等间距,而是由中间向两边变得越来越密,这表明线性啁啾光栅本身的色散引起了自由谱宽的变化.当 ΔL 增大时,自由谱宽较大的位置左移,如图 4(b)所示;当 ΔL 增大到与光

纤光栅本身长度相等或更大时,则自由谱宽由左向

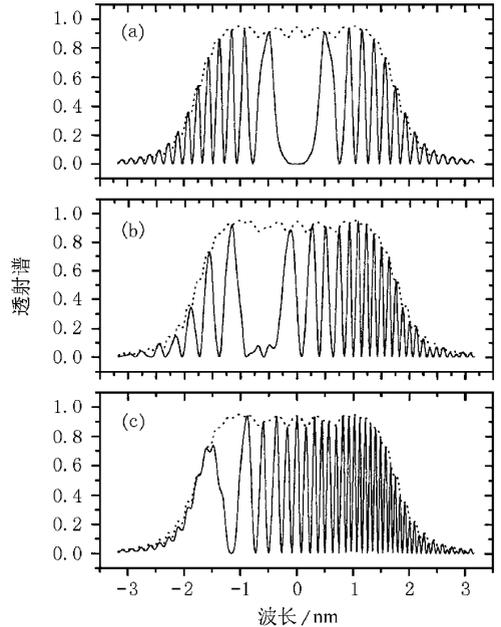


图 4 含有线性啁啾光纤光栅的 Sagnac 环的透射率 (a) $\Delta L = 0$ (b) $\Delta L = 2\text{mm}$ (c) $\Delta L = 5\text{mm}$

右递减,如图 4(c)所示.无论 ΔL 为何值,所得到的透射谱仍然位于原光纤光栅的反射谱包络内.计算还发现如果让 ΔL 或 C 值的符号相反,则自由谱宽的疏密变化趋势也会反过来.为了解释这种非均匀自由谱宽的现象,我们只需简单分析光波被耦合器

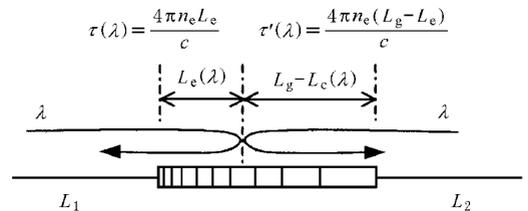


图 5 波长为 λ 的光波在啁啾光栅中传播了有效长度后(在满足 Bragg 条件的位置)被反射.图中画出了从两个不同方向入射导致不同有效长度的情况

分束后直到被啁啾光纤光栅反射回耦合器所历经的相位差.假定从 L_1 和 L_2 端入射的光波在啁啾光纤光栅中(反射)历经的相位变化分别为 $\varphi(\lambda)$ 和 $\varphi'(\lambda)$,则总相位差为 $2\beta\Delta L + \varphi(\lambda) - \varphi'(\lambda)$,令其为 2π 的整数倍且进行微分,很容易得到自由谱宽

$$FSR = \frac{c}{2n_c \Delta L + d[\tau(\lambda) - \tau'(\lambda)]}, \quad (7)$$

其中用到了啁啾光栅时延与相位的关系,即

$$\tau(\lambda) = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\varphi}{d\lambda}. \quad (8)$$

如果用将时延简单地用光波在啁啾光纤光栅中传播的有效长度 $L_e(\lambda)$ 表示,如图 5 所示, $\tau(\lambda) = 4\pi n_e L_e / c$, 则(7)式还可简化为

$$FSR = \frac{c}{2n[\Delta L - L_g + 2L_e(\lambda)]} \quad (9)$$

用(9)式很容易解释图 4 中的疏密变化,例如图 4(c)中,由于 $C > 0$, $L_e(\lambda)$ 随波长增加而增加,而 $\Delta L - L_g = 0$, 故 FSR 会随波长增加而减小,因而透射峰随波长增加越来越密。

这种透射峰疏密间隔不等的 Sagnac 环可以用来制作高分辨率、大动态范围的传感器^[3],这是因为它与文献[3]提到的将两个啁啾光栅反方向叠写在同一位置所形成的反射谱与图 4 相类似(尽管将两个光栅叠写构成 FP 腔后形成的是多光束干涉,但当光栅反射率较低时(< 0.6)与双光束干涉形成的余弦干涉条纹完全类似)。与文献[3]的传感结构比较,用本文的结构作为传感器有以下两个优点: 1) 仅需写入单个光栅,无须考虑写入两个完全相同但方向放置相反的光栅的复杂工艺,降低了成本; 2) 文献[3]中的传感器因耦合器引入了 6dB 损耗,而本文结构虽用了耦合器却不存在这种插入损耗。

3 实验结果

我们首先用相位掩模法^[8]在载氢的普通单模光纤中制作了一个长度为 15mm、周期为 537.5nm 的 Bragg 光纤光栅,由于光源本身强度的高斯分布导致实际得到的光纤光栅是一个典型的高斯光栅^[6],这也可以从图 6(a)所示的光纤光栅的反射谱可以看出:在短波方向存在因光纤光栅本身 FP 效应导致的反射率强烈震荡,在震荡区右边有大约 1.44nm 宽、反射率接近 100% 的区域可供下面的实验观察用。反射谱或透射谱的测量采用我们自行研制的一套高分辨率光纤光栅测试系统^[9],测量时分辨率设定为 0.005nm。将高斯光纤光栅与一个 3dB 耦合器焊接成图 1 所示的 Sagnac 环,在接续过程中精密控制两臂长度差,两次接续分别使 $\Delta L = 5\text{mm}$ 和 10mm,测得的透射谱分别如图 6(b)和(c)所示,在图 6(b)中可看到平均间隔约 0.167nm 的 8 个通带,在图 6(c)中可看到平均间隔约 0.087nm 的 16 个通带。这些波长间隔与(6)式的计算结果非常接近,各个通带形状也与图 2 很相似。值得注意的是由于我们所用的光栅不是均匀 Bragg 光栅,实验观察到的通带间隔并非完全相等,而是随波长增加有稍

许增加,这实际上是因为所用高斯光栅有效折射率的非均匀分布导致了一定的啁啾效应(因 $\lambda_B = 2n_e \Lambda$, n_e 和 Λ 的变化都会引起啁啾)。由于我们目前制作的光纤光栅的反射带宽较窄,因此只能演示多个很窄的通带,实际上采用一些高掺锗的特种光纤可以将均匀 Bragg 光纤光栅的带宽制作在 10nm 以上^[10],这样就可能制作出符合目前密集波分复用间隔(0.8nm)的多通带滤波器,这将是我们下一步的研究目标。

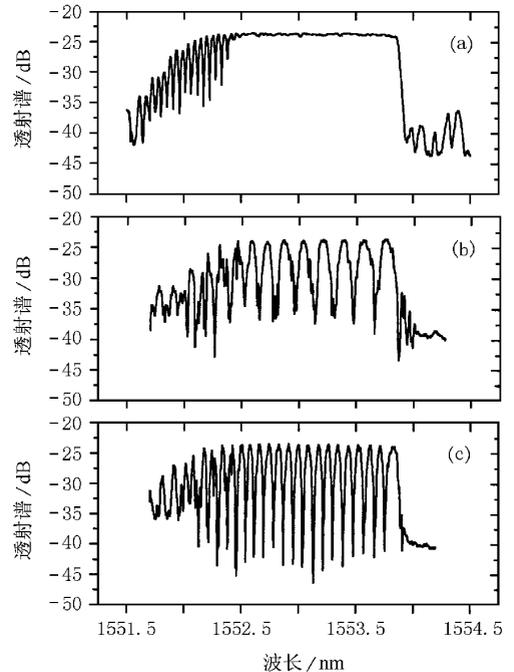


图 6 实验所测一个高斯光栅的反射谱及其用于 Sagnac 环中制成的多通带滤波器的透射谱 (a)反射谱 (b) $\Delta L = 5\text{mm}$ (c) $\Delta L = 14\text{mm}$

4 结 论

提出了一种结构新颖的 Sagnac 干涉仪,分析计算了所含光纤光栅分别为均匀 Bragg 光栅和线性啁啾光栅时的透射响应,得到了均匀光栅 Sagnac 环的解析解,发现含均匀光栅时可得到 FSR 均匀的通带结构,而含啁啾光纤光栅时只能得到 FSR 非均匀的通带结构。这两种结构都可能具有应用价值,前者可用在密集波分复用系统中,后者可用在光纤传感领域中。实验制作了两种通带间隔不同的、通带数分别为 8 和 16 的多通带滤波器,实验证实了理论计算得到的结果。

- [1] F. Bilodeau *et al.*, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **7**(1995), 388.
- [2] R. Kashyap, *Opt. Commun.*, **153**(1998), 14.
- [3] K. P. Koo *et al.*, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **10**(1998), 1006.
- [4] B. Ortega *et al.*, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **10**(1998), 1124.
- [5] K. O. Hill *et al.*, *Electron. Lett.*, **23**(1987) A65.
- [6] T. Erdogan, *J. Lightwave Technol.*, **15**(1997), 1277.
- [7] X. W. Shu *et al.*, *Acta Optica Sinica*, **18**(1998), 1380(in Chinese) [舒学文等, *光学学报*, **18**(1998), 1380].
- [8] K. O. Hill *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **62**(1993), 1035.
- [9] X. W. Shu *et al.*, *Chinese J. Laser*, **18**(accepted for publication).
- [10] V. Mizrahi *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **63**(1993), 1727.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS ON SAGNAC INTERFEROMETER BASED ON SINGLE OPTICAL FIBER GRATING*

SHU XUE-WEN¹⁾ HUANG DE-XIU¹⁾ DENG GUI-HUA²⁾ SHI WEI²⁾ JIANG SHAN²⁾

¹⁾ *Department of Optoelectronics, Huazhong University of Sciences and Technology, Wuhan 430074, China*

²⁾ *Solid Devices Institute, Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications, Wuhan 430074, China*

(Received 5 December 1999 ; revised manuscript received 4 April 2000)

ABSTRACT

A novel Sagnac interferometer employing an optical fiber grating in its loop is presented. The transmission responses of the loops with uniform Bragg gratings and linearly chirped fiber gratings are calculated. The analytic expressions for the loop with a uniform Bragg grating are given. It is found that the loop of a uniform grating leads to equally spaced band-passes, while that of a chirped fiber grating leads to unequally spaced band-passes. Such Sagnac loops may find applications in dense wavelength division multiplexing (DWDM) systems and optical fiber sensing. The multiple band-passes filters with 8 and 16 channels are demonstrated experimentally. The experiments verify the results of our analysis.

Keywords : fiber grating , Sagnac interferometer , optical filter

PACC : 4281 , 4280F , 4280B