

文章编号: 0258-7025(2003)02-0159-04

光纤光栅 Sagnac 环特性及包络带通滤波器的研究

钱景仁, 梁明

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系光纤实验室, 安徽 合肥 230027)

摘要 对光纤光栅 Sagnac 环的传输光谱进行了理论分析和实验验证, 在此基础上提出并实现了基于非对称光纤光栅 Sagnac 环的包络带通结构, 该结构可以将光栅的带阻特性转换成带通特性, 可在光纤光栅传感领域得到应用。

关键词 光电子学; 光纤光栅; Sagnac 环; 包络带通滤波

中图分类号 TN 253 **文献标识码** A

Analysis of the Fiber Bragg Grating Sagnac Loops and the Optical Envelope Bandpass Filter

QIAN Jing-ren, LIANG Ming

(Optical Fiber Laboratory, Electronic Engineering and Information Science Department, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China)

Abstract The transmission characters of fiber Bragg grating Sagnac loop are investigated theoretically and experimentally. Optical envelope bandpass-filtering characteristics based on asymmetric grating Sagnac loop which transforms grating bandpass-resistance character into grating bandpass-filter character and can be applied in optical fiber grating sensors are demonstrated.

Key words optoelectronics; optical fiber grating; Sagnac loop; envelope bandpass filter

1 引言

近年来, 光纤光栅技术得到了迅速的发展, 在光纤通信和光纤传感领域都得到了广泛的应用。光纤 Bragg 光栅本质上是波长选择性光反射器。利用其谐振波长随外界条件变化的特性, 可以实现对温度、应变等参量的测量^[1]。而其反射特性使它特别适合于多点的分布式传感: 将谐振波长不同的光栅放置于不同的被测点, 分别测量各个谐振波长的变化, 就可以得到各点被测量的信息。

通常, 光纤 Bragg 光栅反射信号的获取是通过 3 dB 耦合器或者环形器^[1,2], 如图 1 所示。然而, 前者给系统引入了 6 dB 损耗, 后者则增加了成本。因此, 找寻一种简易、低损的方法实现光栅反射信号的

提取, 是十分有意义的。

利用 3 dB 耦合器构成的光纤光栅 Sagnac 环具有传输型带通特性, 其输出光谱受到两臂长度差的严重影响。当两臂光程差为 0 时^[3], 其输出光谱与光栅的反射光谱一致, 是理想的带通滤波器结构, 但实现较困难。有人利用两臂有较小光程时, 构成光栅反射带宽内的梳状滤波器, 实现多波长光源^[4], 以及全光纤调 Q 激光器。而全面对其作较深入的研究未见报道。

本文分析了光纤光栅 Sagnac 环在各种条件下的传输特性, 并在此基础上, 提出了采用非对称光纤光栅 Sagnac 环实现光栅带阻特性向带通特性转换的方法, 其带通特性与原光栅的带阻特性互补, 且其

收稿日期: 2001-12-17; 收到修改稿日期: 2002-02-01

作者简介: 钱景仁(1935—), 男, 江苏省吴江市人, 中国科学技术大学电子工程与信息科学系教授, 博士生导师。主要从事光纤有源和无源器件的研究。E-mail: jrqian@ustc.edu.cn

输出比直接利用 3 dB 耦合器获得的光栅输出减少了 3 dB 的功率损失。这种利用 Sagnac 环实现将光栅带阻特性转换为带通特性的结构在光纤光栅传感中将得到应用。

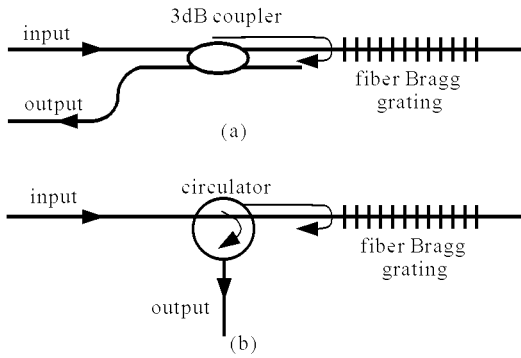


图 1 常用光栅反射信号获取方案

(a) 直接使用 3 dB 耦合器; (b) 使用环形器输出

Fig. 1 Conventional method of obtaining fiber grating reflected signal

(a) using 3 dB coupler directly; (b) using circulator

2 理论分析

光纤光栅 Sagnac 环由一只 Bragg 光栅 (FBG) 和一个 3 dB 耦合器构成^[4], 实验系统如图 2 所示。其中 BBS 为掺铒光纤宽带光源, OSA 为光谱分析仪。Isolator 为光隔离器。

由 3 dB 耦合器分配到光栅环的两臂的宽带光

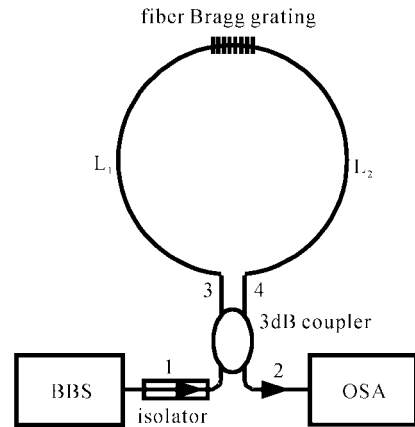


图 2 光纤光栅 Sagnac 环结构实验系统

Fig. 2 Fiber Bragg grating Sagnac loop structure experiment system

源的输出光, 其功率相等, 相位相差 $\pi/2$ 。未被 FBG 反射的光, 沿顺时针和逆时针两个方向分别绕环一周后在耦合器中发生干涉, 这时, 耦合器所引入的两次相位差相互抵消, 故光全部由 1 端返回。而对于由 FBG 反射的光, 光栅环的作用类似于一个光栅 Michelson 干涉仪^[5,6]。由于耦合器所引入的两臂相位差重复作用, 当两臂光程差为 0 时, 反射光全部由 2 端输出; 当两臂光程差不为 0 时, 2 端的输出光具有梳状光谱分布。

光纤光栅 Sagnac 环的光谱传输特性可表示为^[4]

$$T = \frac{[(1-2K)\sqrt{k^2-\delta^2} + 2k\sqrt{K(1-K)}\sinh^2(\sqrt{k^2-\delta^2}L_g)\cos(\beta\Delta L)]^2}{k^2\cosh(\sqrt{k^2-\delta^2}L_g) - \delta^2} \quad (1)$$

其中, δ 为光栅失调, β 为模式传输常数, Λ 为光栅周期, k 为光栅耦合系数, L_g 为光栅长度, K 为耦合器的耦合率, $\Delta L = L_1 - L_2$, 为两臂长度差。

输出光谱峰值间距由 ΔL 决定

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2n_e\Delta L} \quad (2)$$

根据(1)式可以求得光栅环的传输特性, 如图 3 所示。需要注意的是, 除了光栅谐振的主峰外, 在光栅反射带宽之外, 还有一系列边峰, 这些边峰是光栅自身的波长响应, 与 Sagnac 环结构无关。

取光栅 3 dB 线宽为 0.4 nm。当 $\Delta L = 0$ 时, 输出光谱与光栅原有反射谱完全相同, 如图 3(a) 虚线所示, 是一个较为理想的带通滤波器, 但在实际应用中, 实现 $\Delta L = 0$ 较为困难^[2,6]; 当 ΔL 为毫

米量级时, 输出光谱波峰间距 $\Delta\lambda$ 为 0.1 nm 量级, 与光栅原有反射谱的线宽可以比拟, 在光栅反射带宽内可以明显看出周期性功率变化, 如图 3(a) 中实线和三角符号所示; 当 ΔL 达到几十厘米时, 如图 3(b), $\Delta\lambda$ 为 10^{-3} nm 量级, 大多数仪器将无法分辨。此时, 光栅环传输光谱的包络图形却与图 3(a) 中 $\Delta L = 0$ 时的曲线相同, 即与光栅原有反射光谱一致。由此可见, 光栅环的传输特性在包络意义上是一个带通滤波器。当采用光谱仪等仪器进行光谱测量时, 由于 $\Delta\lambda$ 远小于仪器的分辨率带宽, 仪器所能显示的光功率谱密度是在其分辨率带宽范围内的平均值, 此时的输出光谱峰值将比实际包络峰值低 3 dB, 即从平均意义上看, 光栅环的传输光谱有 3 dB 的功率损失。比直接利用 3 dB

耦合器获取光栅反射光的普通结构(如图 1(a))所 引入的 6 dB 功率损失少 3 dB。

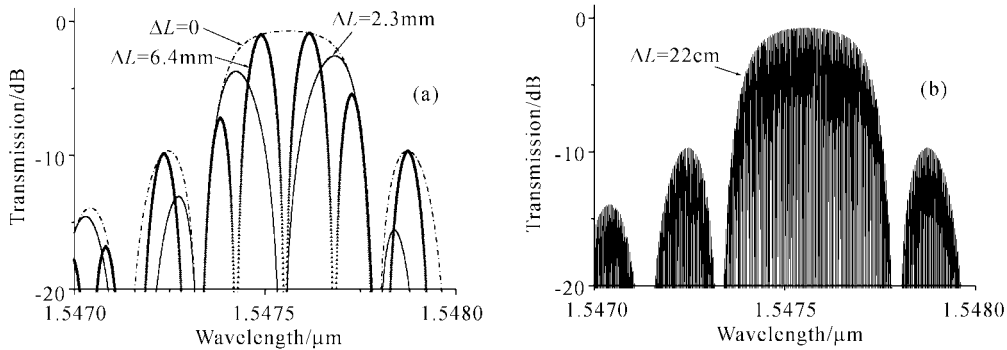


图 3 光纤光栅 Sagnac 环理论传输光谱
(a) ΔL 较小; (b) ΔL 很大

Fig. 3 Theoretical transmission spectrum of the fiber grating Sagnac loop
(a) ΔL is small; (b) ΔL is very large

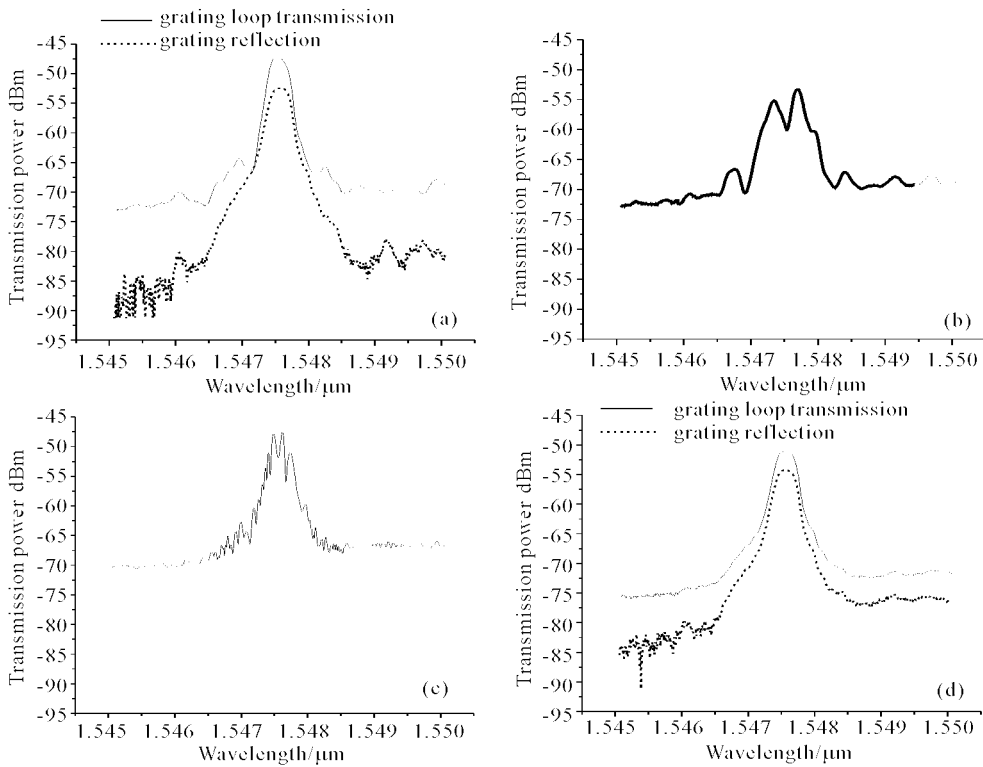


图 4 光纤光栅 Sagnac 环实验传输光谱
(a) $\Delta L < 1$ mm 时输出光谱与 4 端切断时输出光谱比较; (b), (c) ΔL 为毫米量级;
(d) $\Delta L > 22$ cm 时 2 端输出光谱与 4 端切断时 2 端输出光谱比较

Fig. 4 Experiment spectrum of fiber grating Sagnac loop transmission character

(a) the output spectrum while ΔL is close to 0 comparing to the output spectrum while the fiber is cut off at port 4; (b), (c) ΔL is a few millimeter; (d) the output spectrum while $\Delta L > 22$ cm comparing to the output spectrum while the fiber is cut off at port 4

3 实验结果及讨论

在已有理论研究的基础上,利用图 2 所示系统

进行光纤光栅 Sagnac 环传输特性实验研究。所选用光纤光栅的中心反射波长为 1547.6 nm,反射率 20 dB,3 dB 带宽 0.34 nm;3 dB 耦合器分光比为 1:1。

利用光谱分析仪在不同的臂长差情况下测得 2 端输出光谱,如图 4 所示。比较图 3 与图 4,发现实验结果与理论计算符合得很好。当光栅环两臂光程差小于 1 mm 时,光栅环的输出光谱与光栅反射光谱非常接近,如图 4(a)所示,并且其峰值功率比 4 端切断时光栅反射输出光谱高 5.4 dB,接近于 6 dB 的理论值;当光程差为毫米量级时,其输出光谱有明显的周期性峰值分布,如图 4(b),(c)所示;当光程差达到几十厘米时,由于远大于光谱仪内扫描光束的相干长度,图 3(b)中的图形将显示不出来,而观察到的是比包络值低 3 dB 的平均值。该曲线形状与 4 端切断时光栅反射光谱非常相似,如图 4(d)所示,而峰值功率高 3.1 dB,与理论预计接近吻合。

在光纤光栅传感应用中,采用包络带通滤波并不会影响光纤光栅波长移位检测的准确性。特别在只关心一定带宽范围内通光功率时,完全可以采用光栅环包络滤波器。例如,在光栅应变传感应用中,可以用光栅追迹法来测量波长移位;这时就可以选用光栅环作为追迹光滤波器。采用干涉型波长移位检测方案的传感器,由于检测时关心的是中心波长

附近一定带宽范围内的光功率变化,在 $\Delta\lambda$ 远小于光栅波长移位的测量精度时,采用包络带通结构不会影响测量的准确性。因此,光纤光栅 Sagnac 环包络带通滤波结构在光栅传感领域具有应用价值。

光纤光栅 Sagnac 环结构也可以应用于分布式传感中,如图 5 所示。一个多点的分布式光栅传感结构由一个 3 dB 耦合器和一组波长不同的光纤光栅组成^[1],输出端可以同时输出各个光栅的反射光,监测各个光栅反射波长的变化,即可测得各个不同位置的环境参量。按图 5 中的虚线将带有光栅的光纤末端与 3 dB 耦合器的另一输出臂相连,即形成一个多光栅 Sagnac 环。在光纤总长度不是很长,而每一个光栅两侧的光纤长度差足够大的条件下,多光栅环的输出光谱将包含各光栅的反射光谱,且各个波长的光功率都比直接通过 3 dB 耦合器获得的输出光功率高 3 dB。

需要注意的是,由于光栅环采取了干涉型输出,相干光噪声将对其传感应用有不利的影响,且会因检测方案的差异而有所不同。这种差异以及如何减小不利影响尚待进一步研究。

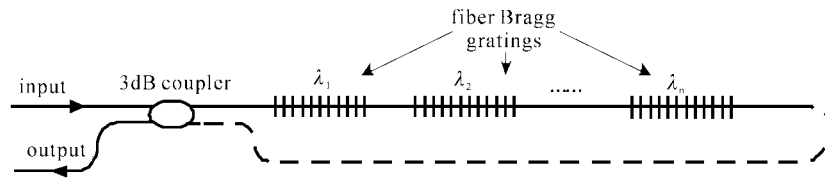


图 5 多光栅 Sagnac 环分布式传感系统

Fig. 5 Multi-grating Sagnac loop distributed sensors system

参 考 文 献

- 1 A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*, Fiber grating sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1442~1463
- 2 Sungchul Kim, Seungwoo Kim, J. Kwon *et al.*, Fiber Bragg grating strain sensor demodulator using a chirped fiber grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(8):839~841
- 3 K. O. Hill, D. C. Johnson, F. Bilodeau *et al.*, Narrow-bandwidth optical waveguide transmission filters [J]. *Electron. Lett.*, 1987, **23**(9):465~466
- 4 Xuewen Shu, Shan Jiang, Dexiu Huang. Fiber grating Sagnac loop and its multiwavelength-laser application [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(8):980~982
- 5 R. Kashyap. A new class of fiber grating based band-pass filters: the asymmetric interferometer [J]. *Opt. Comm.*, 1998, **153**(1):14~18
- 6 F. Bilodeau, K. O. Hill, B. Malo *et al.*, High-return-loss narrowband all-fiber bandpass Bragg transmission filter [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(1):80~82