

文章编号: 1002-2082(2008)SO-0117-03

基于干涉原理的光纤 Bragg 光栅反射光谱特性分析

付建伟, 肖立志, 于慧俊

(中国石油大学(北京) 资源与信息学院, 北京 102249)

摘要: Bragg 条件方程是光纤传感技术的理论基础之一, 对理解光纤 Bragg 光栅的传感机理具有重要的理论价值。从光的干涉原理出发研究了光纤 Bragg 光栅的反射光谱特性, 推导出 Bragg 条件方程。结果表明: 利用干涉原理推导出的结果与利用模耦合理论推导出的结果吻合较好。

关键词: 光纤 Bragg 光栅; 干涉原理; Bragg 条件方程

中图分类号: TN253

文献标志码: A

Reflection spectrum characteristics of FBG based on interference principle

FU Jian-wei, XIAO Li-zhi, YU Hui-jun

(Faculty of Natural Resource and Information Technology, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China)

Abstract: Bragg condition equation is one of the most important fundamental theories for FBG sensor, and has important value for the study of the mechanism of FBG sensors. The reflection spectrum characteristics of FBG were studied and the Bragg condition equation was obtained by the aid of the light interference principle. The analysis shows that the result derived by the light interference principle is consistent with the one deduced by the coupled-mode theory.

Key words: FBG; interference principle; Bragg condition equation

引言

1989 年, Morey 等人第一次提出把光纤 Bragg 光栅用于传感领域^[1], 由于光纤 Bragg 光栅具有独特的优点, 引起了人们的广泛关注。

光纤 Bragg 光栅传感器的基本原理是: 当光入射到 Bragg 光栅时, 符合 Bragg 条件的一部分能量被反射回来, 因而入射光的透射光谱和反射光谱在某一波长处出现奇异性, 如图 1 所示。

在反射 Bragg 光谱中, 当外界温度应力发生变化的时候, 将引起 Bragg 波长的变化。光纤 Bragg 光栅传感的基本原理是通过检测反射 Bragg 波长的变化获取外界温度或应力的变化信息。因此必须确

切知道影响 Bragg 波长漂移的因素, 有必要对反射光谱的反射特性进行分析。

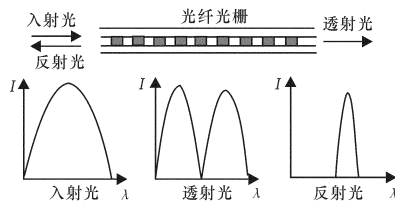


图 1 光纤光栅的光谱特性

Fig. 1 Spectral characteristic of fiber grating

对光栅反射光谱特性分析最多的是利用光波导理论中的模耦合理论描述波场特性, 进而研究光

收稿日期: 2007-12-12

基金项目: 中国石油天然气集团公司中青年创新基金(05E7014); 中国石油天然气集团公司应用基础研究(05B30203)“井下永久性光纤传感器设计方法研究”项目资助

作者简介: 付建伟(1974-), 男, 安徽砀山人, 博士, 主要从事光纤 Bragg 光栅传感技术在油气藏动态监测中的应用研究。

E-mail: jianweifu2003@163.com

传输的规律,但其推导非常复杂,而且需做大量假设^[2]。为了帮助了解光栅的光波传输特性,下面利用光的干涉原理来分析光栅的光波传输规律。

1 反射光谱特性分析

光波的传输函数可以表示为

$$I = I_0 e^{(-i \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda} z)} \quad (1)$$

式中: I_0 为光波的反射振幅; n_{eff} 为纤芯有效折射率; λ 为光波波长; z 为光传播的路径。

根据反射定律,光波在 2 种不同折射率的介质中传播时,在界面处发生反射,振幅反射系数^[3]为

$$r = \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}, \quad t = 1 - r = 2 \frac{n_1}{n_2 + n_1} \quad (2)$$

式中: r 为振幅反射系数; t 为振幅透射系数; n_1

和 n_2 分别为界面处的折射率。从(2)式可以看出,振幅反射系数等于折射率的相对变化,在光纤光栅中,折射率微调方程为 $n(z) = n_0 + \delta \cos(m \frac{2\pi}{\Lambda} z)$, 其中 Λ 为光栅周期,因此可以得到在任意点 z 处的光波振幅反射系数为

$$r = \frac{dn}{2n_0} = - \frac{m\pi\delta}{n_0\Lambda} \sin(m \frac{2\pi}{\Lambda} z) dz \quad (3)$$

在光栅端点处的反射光为多束反射光的叠加,由于 δ 是一个非常小的量,透射系数近似为 1,可以忽略光的多次反射。设光栅的长度为 L , 距离光栅端点 z 处的反射光到达端点处与端点反射的光的光程差为 $2z$, 设 $k_0 = m \frac{2\pi}{\Lambda}$, $k = \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda}$, 则端点接收到的光可以表示为

$$I = - \frac{\delta I_0 \pi}{n\Lambda} \int_0^L \sin(\frac{2\pi}{\Lambda} z) \exp(-i \frac{4\pi n_{\text{eff}}}{\lambda} z) dz = i \frac{\delta I_0 k_0}{2n} \int_0^L [\exp(ik_0 z) - \exp(-ik_0 z)] \exp(-i2kz) dz = i \frac{\delta I_0 k_0}{2n} \int_0^L [\exp(i(k_0 - 2k)z) - \exp(-i(k_0 + 2k)z)] dz \quad (4)$$

当满足条件 $k_0 - 2k = 0$ 时,(4)式第一项积分为 L , 当光栅周期和波长很小, m 为正整数时, $k_0 + k \gg 1$, 第二项积分趋近于 0, 此时反射光的能量最强。当不满足 $k_0 - 2k = 0$ 时,(4)式积分后得到:

$$I = \frac{\delta I_0 k_0}{2n} \left[\frac{\exp(i(k_0 - 2k)L) - 1}{k_0 - 2k} + \frac{\exp(-i(k_0 + 2k)L) - 1}{k_0 + 2k} \right] \quad (5)$$

对上式求出实部和虚部,求模即为反射光强反射率,得到光强反射系数与波长之间的关系式。图 2 为通过数值模拟获得的不同光栅周期的光强反射系数与波长的关系谱,即光栅反射谱。

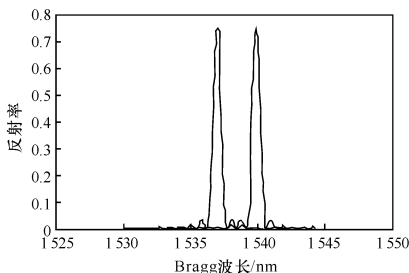


图 2 光纤 Bragg 光栅的反射光谱

Fig. 2 Reflection spectra of FBG

假设光纤 Bragg 光栅中的折射率为严格的余弦形式,即 $m = 1$, 此时由最大反射条件 $k_0 - 2k = 0$, 推导出光栅的反射条件为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (6)$$

通过设计不同周期的光栅,可以在一根光纤上串联多个光栅,而光栅的反射光谱不会发生重叠。光纤 Bragg 光栅的这一特点使得光纤光栅特别适合采取波分复用技术进行分布式测量。

光纤光栅的反射 Bragg 波长取决于光栅周期和反向耦合有效折射率,任何使这 2 个参数发生变化的物理过程都将引起光纤光栅 Bragg 波长的漂移。正是基于这一点,人们提出了一种基于波长检测的新型光纤传感机理并得到广泛应用。

2 结论

通过干涉原理,可以推导出光在均匀光栅中的传输特性,其结果和利用模耦合理论推导出的 Bragg 反射条件方程一致,可以很好地解释 Bragg 反射光谱特征,对理解光栅的传感机理具有重要的意义。然而,基于干涉原理的推导过程仅适用于光栅周期均匀的 Bragg 光栅,对于周期不均匀的光栅的适用还有待进一步研究。

- 参考文献:
- [1] MOREY W W, MELTZ G, GLENN W H. Fiber optic Bragg grating sensors[J]. SPIE, 1989, 1169: 98-107.
- [2] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京:清华大学出版社, 2000.
- [3] 陈丽菊, 肖胜利, 朱峰, 等. 对光学薄膜反射率的讨论[J]. 太原师范学院学报:自然科学版, 2005, 4(3): 77-79.