

分布布拉格反射光纤激光器的特性分析*

张劲松 赵玉成 谢增华 陈根祥 简水生
(北方交通大学光波所, 北京 100044)

摘 要 利用耦合模理论和数值方法, 对分布布拉格反射光纤激光器的特性进行分析, 对利用不同光栅作反射镜的激光器阈值增益谱进行了比较。为进一步的设计与制作提供了理论指导。

关键词 光纤光栅, 分布布拉格反射, 光纤激光器。

1 引 言

窄带、单频(单纵模)激光光源在光通信、传感、光谱学等领域有着广泛的应用。自 Kashyap^[1]首次将光纤光栅(1500 nm)应用于光纤激光器以来, 光纤激光器愈受重视, 得到大量研究^[2-7], 这是因为它具有与光纤的兼容性好、制作简便、抗电磁干扰、稳定性高等优点。为了克服增益介质的空间烧孔效应而实现单模运转, 一种方案是环形光纤激光器, 但常发生模式跳跃。另一种就是短腔分布布拉格反射结构光纤激光器, 少数落在光栅反射带宽内的纵模由于模竞争而最终实现单模输出。本文对分布布拉格反射光纤激光器的特性进行理论和数值分析。

2 耦合模理论分析

分布布拉格反射光纤激光器的结构如图 1 所示。

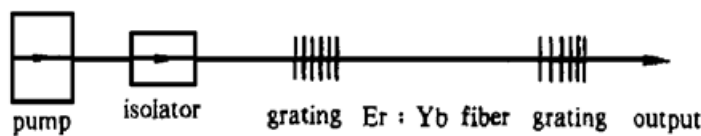


Fig. 1 DBR fiber laser configuration

从概念上讲, 分布布拉格反射激光器是其反射率与频率有关的端面式法布里-珀罗腔激光器。这里首先分析起着端面反射镜作用的光栅的光学特性。光栅的折射率调制 Δn 可表示为:

$$\Delta n = \Delta n_0 + \Delta n_1(z) \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + 2 \int_0^z (\xi) d\xi \right] \quad (1)$$

式中, Δn_0 、 Δn_1 分别为 0 级、1 级光栅的折射率调制振幅, Λ 为光栅周期, z 为光纤轴向坐标, 积分项表示沿 z 慢变化的某种啁啾结构。

光栅中, 前向波和反向波耦合方程为^[8]:

* 国家科委 863 高科技资助项目。

收稿日期: 1997-07-13; 收到修改稿日期: 1998-08-24

$$\begin{aligned} \frac{dA^+}{dz} &= iK(z) \exp\left(-2i \int_0^z \Delta\beta(\xi) d\xi\right) A^-, \\ \frac{dA^-}{dz} &= -iK(z) \exp\left(2i \int_0^z \Delta\beta(\xi) d\xi\right) A^+ \end{aligned} \quad (2)$$

式中, A^+ 、 A^- 分别为前向波和反向波的幅度, $K = k\Delta n_1/2$ 为耦合系数, $\Delta\beta(z) = \beta + \delta\beta - \pi/\Lambda - f(z) = \Omega + i\alpha_g/2 - f(z)$, Ω 为相位失配因子, α_g 为光栅材料对光强的吸收系数, β 为基模复传播常数(写入光栅之前), $\delta\beta = k\Delta n_0$, k 为真空中波数。边界条件为 $A^+(-L/2) = 1$, $A^-(L/2) = 0$, L 为光栅长度。

引入本地反射系数, 可将(2)式简化为:

$$\rho' = -i[K(z) + K(z)\rho^2 + 2\Delta\beta\rho] \quad (3)$$

边界条件为 $\rho(L/2) = 0$ 。里卡蒂(Riccati)微分方程(3)式一般很难给出解析解, 下面将利用四阶龙格-库塔(Runge-Kutta)算法对式(3)进行数值求解。为了便于讨论, 假定分布布拉格反射激光器两端的光栅相同。器件中光波往返一周后, 场复振幅不变, 可写出稳态振荡条件:

$$\rho^2 C_0^2 \exp(2i\beta_c d) = 1 \quad (4)$$

C_0 为光栅与腔的功率耦合因子, d 为谐振腔腔长, $\beta_c = n_c k - i(g_c - \alpha_{int})$ 为腔中基模传播常数, n_c 为腔实折射率, g_c 为腔内介质材料单位长度上的振幅增益系数, α_{int} 为腔内单位长度上的损耗。由(4)式可得到振幅与相位方程:

$$|\rho^2| C_0^2 \exp[2(g_c - \alpha_{int})d] = 1 \quad (5)$$

$$n_c k d + \Phi = m\pi \quad (6)$$

Φ 为复反射系数 ρ 的相位, m 为整数。(5)式、(6)式分别确定纵模的阈值增益和位置。归一化腔净增益可以写成:

$$g_{net}d = g_c d - \alpha_{int}d = \frac{1}{2} \ln(1/C_0^2 |\rho^2|) \quad (7)$$

3 数值分析结果

对高斯型耦合系数线性啁啾光栅, 耦合系数 $K = K_0 \exp(-Gz^2/L^2)$, $f(z) = Fz/L^2$, K_0 为 $z = 0$ 处的耦合系数, F 为啁啾系数, G 为高斯系数。为了使数值结果具有普遍意义, 引入光栅归一化失谐量 ΩL 、归一化耦合系数 $K_0 L$ 、归一化损耗 $\alpha_g L$, 这样可将(3)式写成:

$$\rho' = -\frac{i}{L} [K_0 L \exp(-Gz^2/L^2) (1 + \rho^2) + 2(\Omega L - \frac{F}{L}z + \frac{i}{2}\alpha_g L) \rho] \quad (8)$$

数值计算结果如图 2 所示。

由(7)式给出的分布布拉格反射激光器阈值增益谱如图 3 所示。从图可见: 1) 最低阈值模出现在布拉格波长附近, 这是因为分布布拉格反射的反射率峰值在此区域。2) 与分布反馈激光器不同, 分布布拉格反射激光器纵模谱中不存在阻带(截止带), 这是因为在分布布拉格反射激光腔内不产生分布反馈的结果。3) 均匀光栅分布布拉格反射增益谱较窄, 易于实现单频运转, 但旁瓣比较严重; 啁啾光栅分布布拉格反射增益谱较宽, 不利于实现单频运转; 高斯型耦合系数分布布拉格反射激光器增益谱较窄, 同时模式抑制比高, 有效地抑制了旁瓣, 是实现单频激光器的一种比较理想的方案。

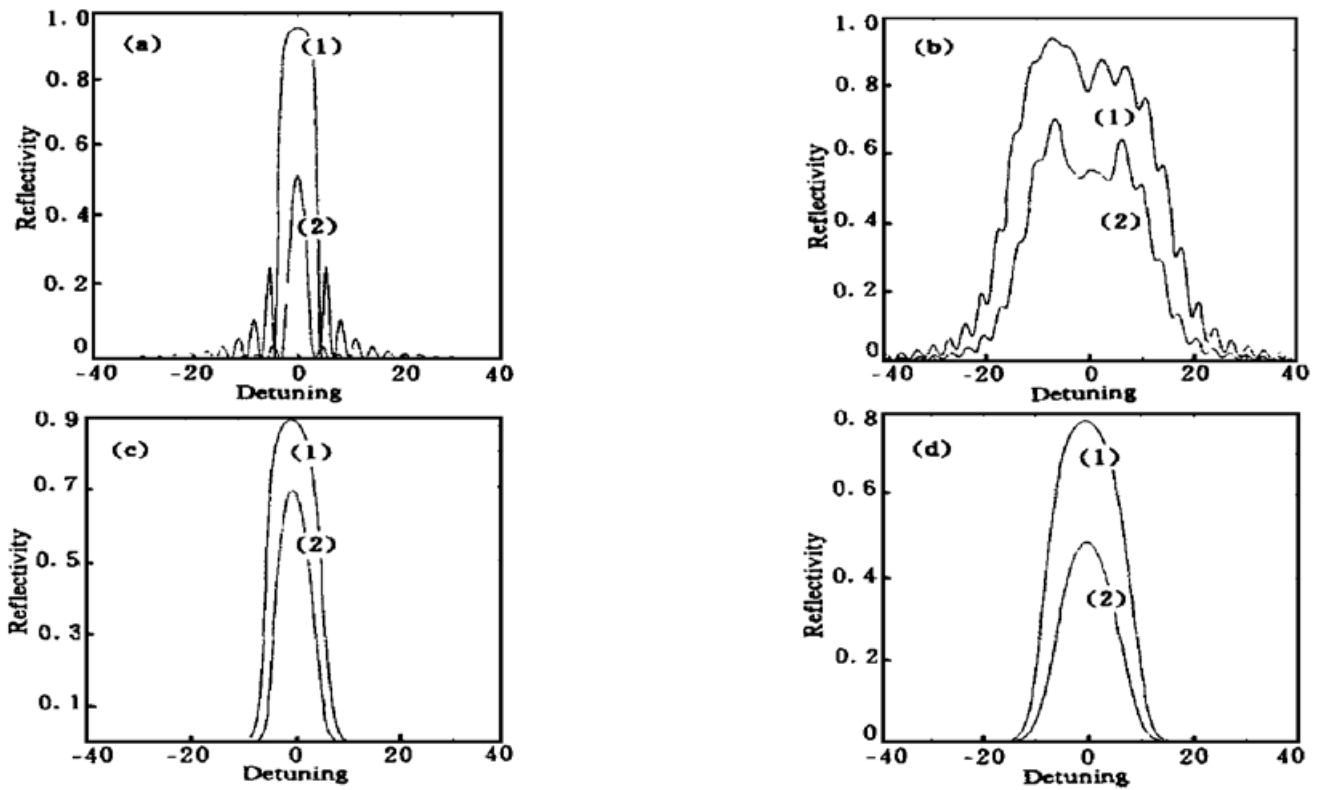


Fig. 2 Grating reflectivity as a function of detuning from the Bragg wavelength. (a) $F = 0$, $G = 0$, (1) $K_0L = 3$, (2) $K_0L = 1$; (b) $F = 30$, $G = 0$, (1) $K_0L = 5$, (2) $K_0L = 3$; (c) $F = 0$, $G = 16$, (1) $K_0L = 5$, (2) $K_0L = 3$; (d) $F = 30$, $G = 16$, (1) $K_0L = 5$, (2) $K_0L = 3$

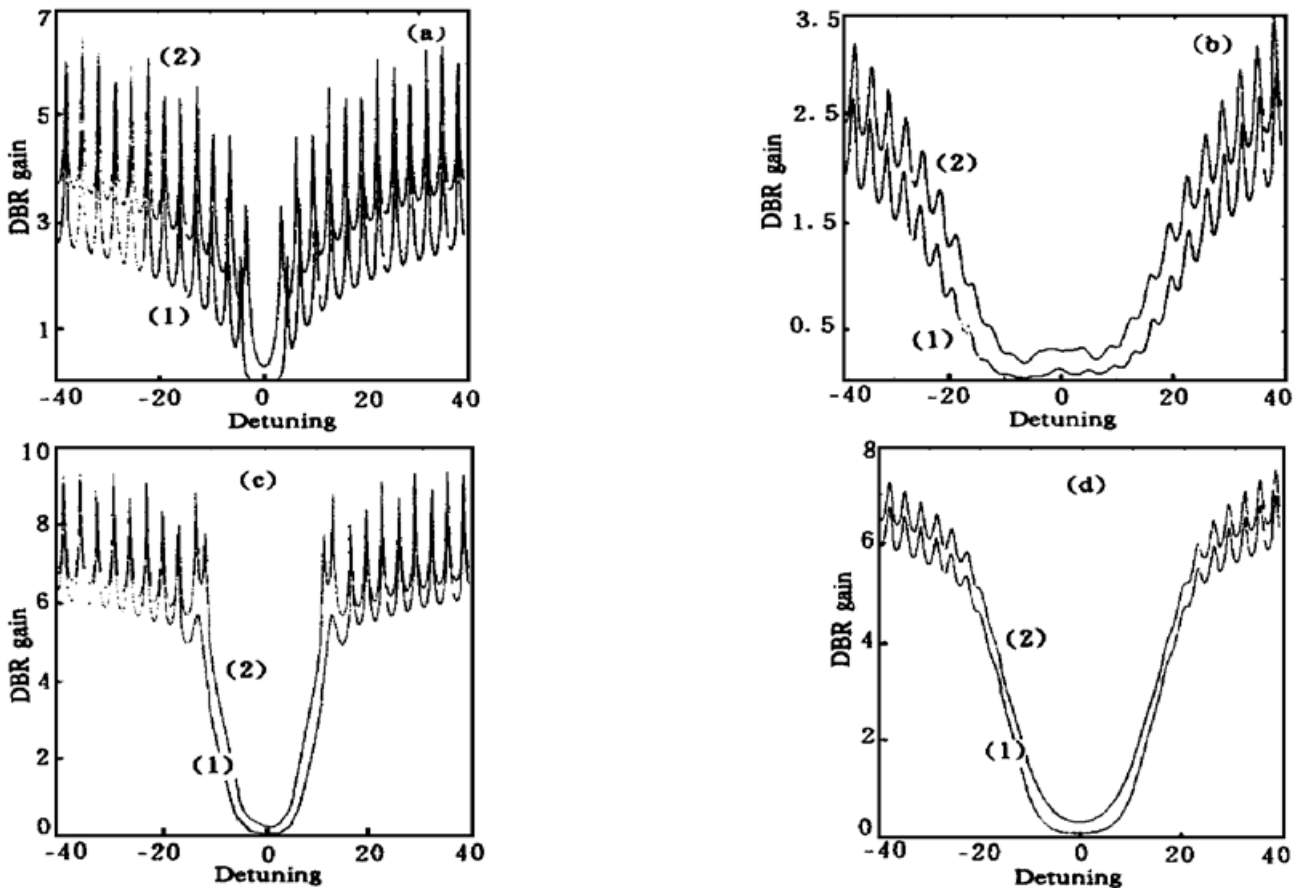


Fig. 3 Threshold gain spectrum for DBR fiber lasers utilizing different gratings ($C_0 = 1$, $\alpha_0L = 0.1$). (a) $F = 0$, $G = 0$, (1) $K_0L = 3$, (2) $K_0L = 1$; (b) $F = 30$, $G = 0$, (1) $K_0L = 5$, (2) $K_0L = 3$; (c) $F = 0$, $G = 16$, (1) $K_0L = 5$, (2) $K_0L = 3$; (d) $F = 30$, $G = 16$, (1) $K_0L = 5$, (2) $K_0L = 3$

结 论 利用耦合模理论和数值方法, 对利用各种光栅作反射镜的分布布拉格反射光纤激光器的光学特性进行分析, 得到了光栅的反射率及分布布拉格反射激光器的阈值增益谱。认为利用高斯型耦合系数光栅作反射镜的分布布拉格反射激光器是实现单频光纤激光器的一种比较理想的方案。这种激光器的优点突出表现在几个方面: 1) 谐振腔的设计非常简单。2) 输出波长可以精确选择并通过改变光栅的温度和应力等来实现连续可调。3) 易于实现窄线宽单频输出, 相干性好。4) 温度稳定性较半导体激光器好。

高斯型耦合系数分布布拉格反射光纤激光器的实际制作也是可行的。对于紫外写入光栅, 可以通过光源强度本身的高斯分布, 在一定程度上实现耦合系数的变化。对于用离子刻蚀法制作的光纤光栅, 可以通过控制刻蚀深度来实现耦合系数随光栅长度的变化。因而, 高斯型耦合系数分布布拉格反射光纤激光器是一项很有前景的研究课题。

参 考 文 献

- [1] Kashyap R, Armitage J R, Wyatt R *et al.*. All-fibre narrowband reflection gratings at 1500 nm. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(11) : 730~ 732
- [2] Kringlebotn J T, Archambault J, Reekie L *et al.*. Highly efficient, low-noise grating-feedback Er^{3+} - Yb^{3+} codoped fibre laser. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(12) : 972~ 973
- [3] Kringlebotn J T, Morkel P R, Reekie L *et al.*. Efficient diode-pumped single-frequency erbium-Ytterbium fibre laser. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 1993, **5**(10) : 1162~ 1164
- [4] Ball G A, Hull-Allen C G, Livas J. Frequency noise of a Bragg grating fibre laser. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(15) : 1229~ 1230
- [5] Ball G A, Morey W W. Continuously tuneable single-mode erbium fiber laser. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(6) : 420~ 422
- [6] Massicott J, Lebre C, Kashyap R *et al.*. Low noise, all-optical gain controlled Er^{3+} doped fibre amplifier using asymmetric control laser cavity design. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(9) : 816~ 818
- [7] Loh W H, Samson B N, Harutjunian Z E *et al.*. Intracavity pumping for increased output power from a distributed feedback erbium fibre laser. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(13) : 1204~ 1205
- [8] 赵玉成, 李唐军, 简水生等. 啁啾光栅色散及时延特性研究. *光学学报*, 1997, **17**(9) : 1270~ 1273

Characteristics of DBR Fibre Lasers

Zhang Jingsong Zhao Yucheng Xie Zenghua
Chen Genxiang Jian Shuisheng

(*Institute of Lightwave Technology, Northern Jiaotong University, Beijing 100044*)

(Received 13 July 1997; revised 24 August 1998)

Abstract Characteristics of distributed Bragg reflector (DBR) fibre lasers are analyzed by means of coupled-mode theory and numerical method. The threshold gain spectrum of DBR lasers with different gratings are compared with each other. It provides theoretical guidance for design and fabrication.

Key words fiber grating, distributed Bragg reflector, fibre lasers.