

基于 SOA 和级联取样光纤光栅的多波长激光器*

张新亮 张 颖 孙军强 刘德明 黄德修

(华中科技大学光电子工程系, 武汉 430074)

(2002 年 9 月 20 日收到, 2002 年 12 月 24 日收到修改稿)

研究了基于半导体光放大器(SOA)和双段级联取样光纤光栅构成的新型结构多波长激光器. 设计了取样光纤光栅, 计算了其反射谱. 模拟了多波长激光器的输出光谱. 基于自行制作的 SOA 和取样光纤光栅, 进行了多波长激光器的实验研究, 得到了间隔为 0.8nm、输出功率不平坦度小于 1.0dB 的 11 个波长输出. 理论和实验两个方面都可以验证: 与基于普通取样光栅的多波长方案相比, 基于双段级联取样光栅的方案能改善输出谱平坦度, 并可提高可激射波长数.

关键词: 半导体光放大器, 取样光纤光栅, 多波长激光器

PACC: 4260D, 4255P, 4280F

1. 引 言

国际互联网(INTERNET)的飞速发展, 许多多媒体宽带综合业务应运而生, 迫切需要发展超高速、超大容量的光纤通信系统和网络. 而密集波分复用(DWDM)技术已被公认为是提高通信容量最有效的方法, 其中符合 ITU-T 标准的 DWDM 光源是需解决的关键问题之一. 目前, 在绝大多数的 DWDM 系统中采用的是分离的、不同波长的 DFB 激光器, 其中需要精密的波长锁定, 成本较高. 如何实现一体化、稳定的 DWDM 多波长光源是近年来的研究热点.

近年来, 随着能带工程的发展, 采用应变量子阱技术的半导体光放大器(SOA)在偏振灵敏度、增益带宽、饱和输出功率等性能方面获得很大改善, 其在光纤通信中的广泛应用重新引起人们的重视, 尤其是用作全光波长转换器^[1,2]和多波长短脉冲源^[3-5]. 与已获得广泛研究并开始应用的多波长光纤激光器相比, 基于 SOA 的多波长激光器具有不需光抽运、在常温下更易得到稳定的多纵模输出、带宽大等优点, 并且在输出功率方面也毫不逊色, 因此具有极大的发展和研究潜力. Papakyriakopoulos 等^[3]利用基于 SOA 的光纤环形腔结构实现了 10 个波长的锁模脉冲输出; Shi 等^[4,5]报道了利用 SOA 的混合腔结构实

现的 20 个波长的锁模脉冲输出.

本文中为了均衡多波长激光器中不同输出波长之间的输出功率, 提出了采用双段级联的取样光纤光栅作为反射滤波器, 合理设计其结构参数, 使其反射谱与 SOA 的增益谱相互补偿, 从而在比较宽的范围内得到均衡的多波长激光输出; 从理论上探讨了双段级联的取样光纤光栅的设计和输出谱模拟, 对实验结果进行了分析和讨论.

2. 方案设计和理论分析

2.1. 方案的提出

图 1 所示为基于 SOA 的直腔结构多波长激光器的实验方案图. SOA 作为增益介质, 一端采用取样光纤光栅作反射镜, 其反射谱呈现梳状滤波特性, 另一端采用光纤环作半透半反输出镜, 形成谐振腔, 一定条件下可以实现多波长激射输出. 光谱分析仪用来观察激射输出结果.

取样光纤光栅由于纤芯内特殊的折射率分布, 使其具有良好的梳状滤波器特性, 并有通道间隔稳定及带宽窄、与光纤完全兼容、性能稳定且易于制作和控制等优点, 因此是实现 DWDM 多波长光源理想的波长选择元件. 但由于 SOA 的增益谱的不平坦,

* 国家重大基础研究(973)计划(批准号: G2000036605)资助的课题.

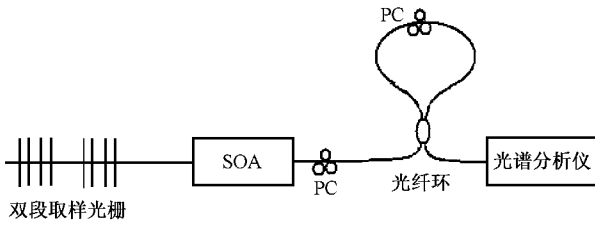


图 1 基于 SOA 和双段取样光纤光栅的多波长激光器方案示意图

利用一般的取样光栅作为波长选择元件后,较难实现功率均衡的多波长输出.因而我们设计出一种新型取样光纤光栅,即通过在一段光纤上制作有一定间隔的两段普通取样光栅,使它们的反射光谱相叠加,而总反射光谱的包络线上会形成两个峰,峰谷对应于 SOA 增益峰值波长,而两个峰值在峰谷的两侧.换言之,通过控制 SOA 增益带宽内不同波长的反射率,使一定范围内 SOA 增益大的波长处光栅的反射率低,而 SOA 增益小的波长处光栅的反射率高,使这些波长在谐振腔内获得净增益尽可能相等,从而实现均衡的多波长激光输出.

2.2. 双段取样光纤光栅设计

通常采用传输矩阵方法^[6]对取样光栅进行分析,取样光纤光栅的反射率表达式为

$$R = |r|^2 = \frac{|C|^2}{|C|^2 + (\sin K\Lambda / \sin N K\Lambda)^2}, \quad (1)$$

其中

$$K\Lambda = \cos^{-1}[(A + D)/2],$$

$$A = [\cosh(sa) + \frac{i\Delta\beta'}{s} \sinh(sa)] e^{i\beta_B b},$$

$$C = -\frac{k}{s} \sinh(sa) e^{i\beta_B b},$$

$$D = [\cosh(sa) - \frac{i\Delta\beta'}{s} \sinh(sa)] e^{-i\beta_B b},$$

以及

$$s = \sqrt{k^2 - (\Delta\beta')^2},$$

$$k = \pi\nu \cdot \Delta\bar{n} / \lambda,$$

$$\Delta\beta' = \beta - \pi/\Lambda + 2\pi \cdot \Delta\bar{n} / \lambda,$$

$$\beta_B = \pi/\Lambda,$$

$$\beta = 2\pi n_{\text{eff}} / \lambda,$$

$$\Lambda = \lambda_B / 2n_{\text{eff}},$$

a 为取样光栅的曝光区长度, $p = (a + b)$ 为取样光栅周期, $\Delta\bar{n}$ 为取样光栅折射率平均变化量, ν 是折射率调制度, k 为光栅交流耦合系数.

在单根光纤上制作的有一定间隔的双段取样光栅,其基本单元仍是普通取样光栅,它的特点是由于两段中心反射峰值和其他参数不同的取样光栅在空间上的串联而引起了频谱叠加,可以使得光谱包络线形成两个峰.我们先讨论双段级联取样光栅总的反射率与每段光栅反射率之间的关系.设输入光功率为 P , 经过光栅后的光功率为 P' , 总的反射率可表示为

$$R = 1 - T = 1 - T_1 T_2 = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2) = R_1 + R_2 - R_1 R_2, \quad (2)$$

其中 T, T_1 和 T_2 分别为总透射率、第一段光栅透射率和第二段光栅透射率.不断改变两段光栅的参数,使不同波长处的功率和反射率满足 $P_i R_i = P_1 R_1 = P_2 R_2$, 其中 P_i 为 SOA 在相应波长处的各纵模输出功率,即可以达到均衡的输出效果.

图 2 和图 3 所示分别为普通取样光栅和双段级联的新型光栅的反射光谱的理论计算结果.普通取样光纤光栅的计算中 $n_{\text{eff}} = 1.45, \nu = 0.5, \Delta\bar{n} = 8 \times 10^{-4}, \Lambda = 0.5345 \mu\text{m}$ (对应中心反射波长 1550nm), $a = 150 \mu\text{m}$ 、振幅掩模板周期 $p = 1020 \mu\text{m}$ (对应波长间隔 $\Delta\lambda = 0.8 \text{nm}$) 以及振幅掩模板周期数 N 为 10. 双段级联的取样光栅的计算中 $\Lambda_1 = 0.5341 \mu\text{m}, \Lambda_2 = 0.5349 \mu\text{m}, a_1 = a_2 = 250 \mu\text{m}, p = 1360 \mu\text{m}$, 两段光栅的有效折射率变化 $\Delta\bar{n}$ 均为 10^{-3} . 从计算的结果可以看出,采用双段级联的取样光栅可以得到“鞍形”的反射谱,对应 SOA 增益峰值波长处的反射率较低,而在其左右两侧 SOA 增益稍低的波长处反射率较高,可望获得均衡的多波长输出.

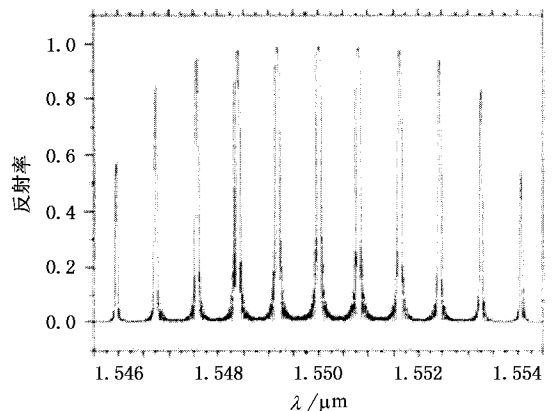


图 2 普通取样光栅反射谱的理论计算结果

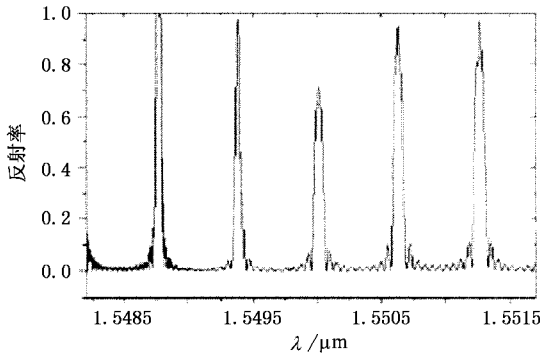


图3 新型取样光栅反射谱的理论计算结果

2.3. 多波长激光器输出谱模拟^[7]

在本方案中,设光纤环的反射系数是 r_m ,它是一个不随波长改变的量. 光纤光栅的反射系数为 $r_g(\lambda)$,它是波长的函数且为复数,并且对于不同的光纤光栅 $r_g(\lambda)$ 的值不同,但都可以表示为

$$r_g = |r_g| \exp(i\phi), \quad (3)$$

其中 ϕ 为光栅相移. 为了产生激射,相应的阈值条件方程可以表示为

$$r_m r_g C_a^2 \exp(2i\beta_1 L_1) \exp(2i\beta_2 L_2) \exp(2i\beta_3 L_3) = 1, \quad (4)$$

其中 C_a 为光纤和芯片间的耦合效率, $\beta_i, L_i (i = 1, 2, 3)$ 分别为上面提到的三部分腔的传播常数和长度. 假设增益、损耗只存在于芯片中,有 $\beta_1 = n_1 k_0 + ig(\lambda)/2 - i\alpha/2$, 其中 α 为吸收系数,忽略吸收系数的波长相关性, $g(\lambda)$ 为 SOA 有源区增益系数,并可表示为

$$g(\lambda) = g_0(N - N_0) - r_2(\lambda - \lambda_N)^2 + r_3(\lambda - \lambda_N). \quad (5)$$

(5) 式中 g_0 为材料微分增益系数, N_0 为透明的载流子浓度, r_2 和 r_3 为增益常数,分别与增益谱宽和增益的不对称性相关, λ_N 是对应特定载流子浓度的增益峰值波长,并有 $\lambda_N = \lambda_p - \mu_0(N - N_0)$, λ_p 是对应透明时载流子浓度的增益峰值波长, μ_0 为波长漂移系数. 计算中这些参数分别取为 $g_0 = 5.0 \times 10^{-20} \text{ m}^2$, $r_2 = 4.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $r_3 = 4.0 \times 10^{26} \text{ m}^{-4}$, $\mu_0 = 1.6 \times 10^{-33} \text{ m}^4$, $N_0 = 1.0 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$, $\lambda_p = 1550 \text{ nm}$. n_1 为有源区的折射率, k_0 为光在真空中的波数. 对于空气间隙和光纤中的传播常数,用 $n_i k_0 (i = 2, 3)$ 来近似. 这样由(4)式可以得到

$$r_m |r_g| C_a^2 \exp(gL_1 - \alpha L_1) = 1,$$

$$\phi + 2n_1 k_0 L_1 + 2n_2 k_0 L_2 + 2n_3 k_0 L_3 = 2m\pi. \quad (6)$$

从相位条件得到可以振荡的各种可能模式,又从阈值条件可以得到其损耗较低的模式,即最终产生激射的模式. 通过循环迭代法对谐振腔内的光波进行数值模拟. 选取计算参数为 $L_1 = 500 \mu\text{m}$, $L_2 = 20 \mu\text{m}$, $L_3 = 2 \text{ cm}$, $n_1 = 3.2$, $n_2 = 1$, $n_3 = 1.46$, $C_a^2 = 0.3$, $r_m = 10^{-4}$. 假设激光器中能同时激射 7 个纵模,计算所得的多波长输出光谱如图 4 和图 5 所示. 图 4 和图 5 分别对应采用普通取样光栅和采用双段级联取样光栅的多波长激光器方案的理论计算输出结果. 由图 4 可以看出,采用普通取样光栅和 SOA 较难实现均衡的多波长输出. 需要说明的是,图 4 和图 5 是在理想的情况下得到的定性模拟结果,在多波长激光器中满足增益阈值条件的波长都可能激射,并且在考虑模式竞争、SOA 增益的偏振相关性以及增益烧孔效应等多种因素的情况下,实际输出与计算结果会有所不同. 另外,由于内部增益的不同,在少数几个模式先激射起来以后,大量消耗了 SOA 中的载流子,其他的模式就激射不起来,因而此时可能激射的波长数也不会太多. 由图 5 可以看出,由于采用双段级联的取样光栅作梳状滤波器,多波长输出光谱在一定范围内基本上是平坦的. 因此,理论上可以证明:相对于普通取样光栅,采用双段级联的取样光栅可以获得更为平坦的多波长输出.

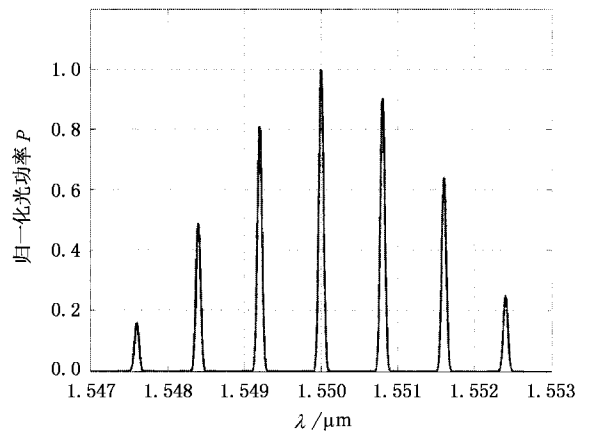


图4 多波长激光器输出光谱的理论计算结果

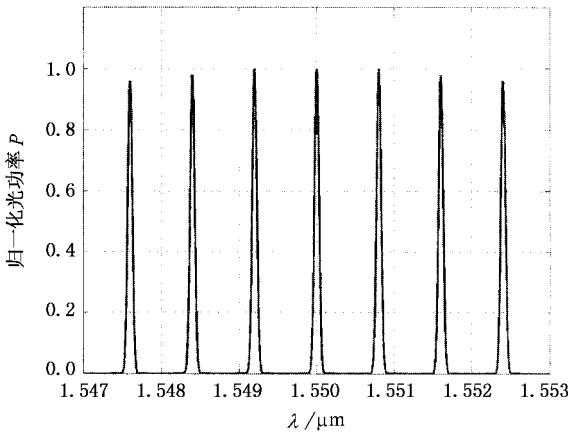


图 5 均衡后多波长激光器输出光谱的理论计算结果

3. 实验研究及分析

实验采用的方案如图 1 所示. 方案中采用的 SOA 是实验室自行研制的, 采用混合应变多量子阱结构, 有源层是由基于 $In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}P_y$ 四元系材料的匹配量子阱和张应变量子垒组成. 取样光栅是自己设计好掩模版后在武汉邮电科学研究院制作. 取样光栅的制作是在光纤光栅的紫外写入过程中, 在相位掩模板前再加一个长周期的振幅掩模板制作出来的, 因此这种光栅相当于多段具有固定间隔的均匀 Bragg 光栅的级联式叠加.

图 6 和图 7 所示分别为实际制作的普通取样光栅和双段级联取样光栅的反射谱. 普通取样光栅的设计参数为 $\Lambda = 0.5345\mu\text{m}$, $p = 1020\mu\text{m}$ 和 $N = 10$. 双段取样光栅的设计参数为 $\Lambda_1 = 0.5335\mu\text{m}$, $\Lambda_2 = 0.5350\mu\text{m}$, $a_1 = 250\mu\text{m}$, $a_2 = 250\mu\text{m}$, $p = 1020\mu\text{m}$, 两段光栅的有效折射率变化 Δn 均为 10^{-3} , 光栅总长度均为 19mm. 可见两段光栅除中心峰值波长不同外, 其余制作光栅的参数均相同. 图 6 表明, 普通取样光栅的反射谱包络呈高斯形, 与理论计算的结果基本符合. 由图 7 可以看出, 双段级联取样光栅的反射谱以 1550nm 为中心呈对称分布, 通道间隔 0.8nm. 在波长 1550.5nm 和 1551.5nm 处, 光栅反射率为 0.48; 1549.7nm 和 1552.3nm 处, 反射率为 0.56; 1548.9nm 和 1553.1nm 处, 反射率为 0.65. 包络的形状与理论计算的结果也基本符合.

图 8 所示为基于普通取样光栅和 SOA 的多波长激光器方案多波长输出光谱图, 由于 SOA 增益谱和普通取样光栅反射谱的不平坦性, 在加上 SOA 增

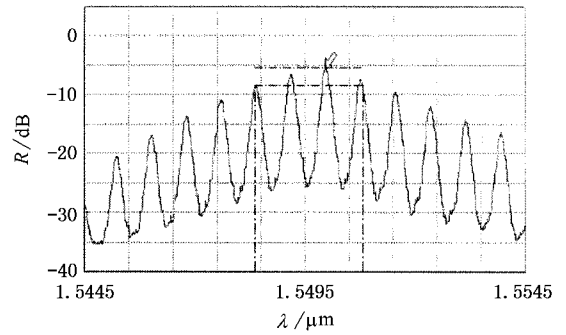


图 6 普通取样光栅的反射谱

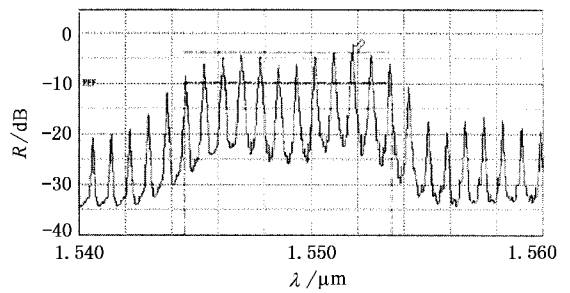


图 7 双段级联取样光栅的反射谱

益的偏振相关性和增益烧孔效应, 输出的 6 个波长输出功率差异近 13dB, 而且输出谱与理论计算结果存在较大的不同.

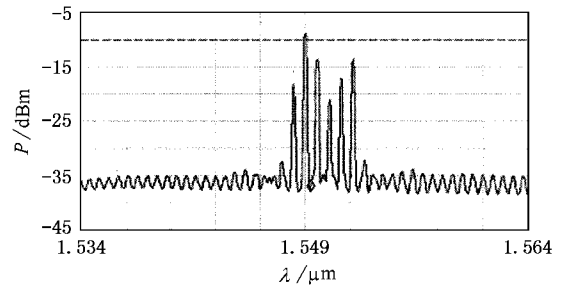


图 8 普通方案的多波长激光器输出光谱

图 9 所示为基于双段级联取样光栅和 SOA 的多波长激光器方案多波长输出光谱图, 该结果是在反复调节两个偏振控制器得到的较为理想结果. 可见, 一共实现了 13 个波长的激射, 除两侧的两个模式输出功率相差较大外, 其他 11 个模式的输出功率差异在 1dB 以内. 可见采用双段级联取样光栅可以在增加可激射波长的同时, 提高输出谱的平坦度, 这与前面的理论分析和计算是相符合的.

需要特别指出的是, 基于 SOA 和双段级联的取

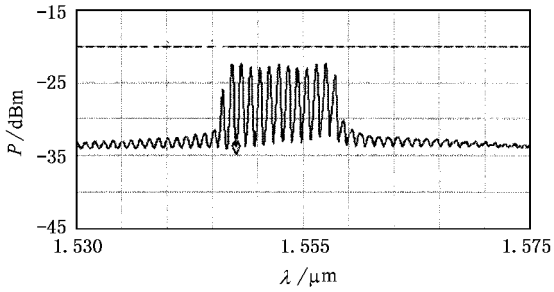


图9 改进方案的多波长激光器输出光谱

样光栅虽然取得了较好的多波长输出结果,但性能离实用化还有一定的距离,其中稳定性是一个最大的问题.由于采用的 SOA 增益偏振不灵敏性不是太好,需要反复调整偏振控制器才能得到较为理想的输出结果,因而 SOA 的性能还有待提高.但方案中提出的利用双段级联取样光栅的鞍形反射谱来补偿 SOA 的增益谱从而均衡多波长输出显然是值得借鉴的思想.

4. 结 论

本文提出一种新颖的改善多波长激光器输出性能的方案,利用双段级联的取样光栅形成的“鞍形”反射谱来与 SOA 高斯形的增益谱相互补偿,使在较大的波长范围内各个模式可获得相近的内部增益,从而增加可激射的波长数目,提高输出谱的平坦度.在理论方面,计算了普通取样光栅和双段级联取样光栅的反射谱,模拟了两种方案的多波长输出光谱,从理论上验证了采用双段级联取样光栅改善输出性能的可行性.利用自行制作的 SOA 和两种取样光栅分别实现了多波长激射,采用普通取样光栅实现了 6 个波长的激射,但输出功率差异接近 13dB;而采用级联的取样光栅实现了功率差异小于 1dB 的 11 个波长输出,从实验上验证了本方案改善输出性能的可行性.

[1] Zhang X L *et al* 2001 *Chin. Phys.* **10** 124

[2] Zhang X L *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 741. (in Chinese] 张新亮等 2000 物理学报 **49** 741]

[3] Papakyriakopoulos T *et al* 1999 *Electronics Letters* **35** 717

[4] Shi H *et al* 1997 *IEEE Photonics Technology Letters* **9** 1439

[5] Shi H *et al* 1998 *Electronics Letters* **34** 179

[6] Yamada M and Sakuda K 1987 *Applied Optics* **26** 3487

[7] Bird D M *et al* 1991 *Electronics Letters* **27** 1115

Multi-wavelength laser based on SOA and cascaded sampled fibre gratings^{*}

Zhang Xin-Liang Zhang Ying Sun Jun-Qiang Liu De-Ming Huang De-Xiu

(*Department of Optoelectronic Engineering , Huazhong University
of Science and Technology , Wuhan 430074 , China*)

(Received 20 September 2002 ; revised manuscript received 24 December 2002)

Abstract

Novel multi-wavelength laser , based on semiconductor optical amplifier (SOA) and cascaded two-stage sampled fibre gratings , is theoretically and experimentally investigated in this paper . The reflection spectrum of the sampled fibre grating and lasing output spectrum are calculated . Exploiting SOA and sampled fibre grating manufactured by our laboratory , a multi-wavelength laser with 11 wavelengths , in which the output power difference is smaller than 1dB , is achieved . Compared with the scheme based on the ordinary sampled fibre grating , more lasing wavelengths and more uniform lasing output power can be achieved in the novel scheme , which can be concluded from both theoretical calculation and experimental analysis .

Keywords : semiconductor optical amplifier , sampled fibre grating , multi-wavelength , laser

PACC : 4260D , 4255P , 4280F

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. G2000036605) .