

## 利用传输矩阵法分析取样光栅 DBR 半导体激光器 \*

高劭宏<sup>1,2</sup>, 黄德修<sup>1</sup>, 高彦锟<sup>1</sup>, 杨新民<sup>3</sup>, 刘德明<sup>1</sup>, 陈俊<sup>1</sup>, 胡振华<sup>1</sup>, 刘小英<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学 光电子工程系, 湖北 武汉 430074; 2. 黑龙江大学 物理科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 华工科技产业股份有限公司, 湖北 武汉 430223)

**摘要:** 取样光栅 DBR(SGDBR)激光器是目前光通讯中最有应用前景的可调谐激光器之一。利用传输矩阵法模拟了取样光栅 DBR 半导体激光器的光谱特性。计算中,把取样光栅 DBR 半导体激光器的增益区、位相区和取样光栅 DBR 看成基本单元。而每一个基本单元都可以看作一个普通的双端口器件。其传输特性用一个  $2 \times 2$  复矩阵表示。在阈值以下,对于有源区和取样光栅 DBR 的不同注入电流,发射光谱显示不同的输出特征。当有源区的注入电流为 9.5 mA 时,主模开始在 1.553  $\mu\text{m}$  附近形成。当取样光栅 DBR 有注入电流时,主模形成的位置发生了变化,表现出可调谐的性质。同时,明显出现主模的有源区的注入电流发生变化。这种方法也反映了激光器的阈值条件。阈值电流为 10 mA。

**关键词:** 可调谐半导体激光器; 传输矩阵法; 取样光栅; 分布布拉格反射器

**中图分类号:** TN248.4    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2005)04-0415-06

## Analysis of sampled grating DBR semiconductor lasers using transfer matrix method\*

GAO Shao-hong<sup>1,2</sup>, HUANG De-xiu<sup>1</sup>, GAO Yan-kun<sup>1</sup>, YANG Xin-min<sup>3</sup>, LIU De-ming<sup>1</sup>,  
CHEN Jun<sup>1</sup>, HU Zhen-hua<sup>1</sup>, LIU Xiao-ying<sup>1</sup>

(1. Department of Opto-Electronics Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China;  
2. School of Science and Technology of Physics, Heilongjiang University, Harbin 150080, China;  
3. Huagong Technology Co., Ltd, Wuhan 430223, China)

**Abstract:** Sampled grating DBR (SGDBR) lasers are the most promising one of the tunable lasers applied in optical communications. The spectral characteristics of sampled grating DBR semiconductor lasers was modeled using transfer matrix method. Gain region, phase region and sampled grating DBR are regarded as elementary parts in calculation. Every elementary part is regarded as a two-port device whose transmission property is expressed by a  $2 \times 2$  complex matrix. Below threshold, emission spectra show different output characteristics under different injection currents into gain region and SGDBR. When the current injected in the active region is 9.5 mA, a main mode begins to arise near 1.553  $\mu\text{m}$ . When there are currents in a sampled grating DBR, the positions at which main modes

收稿日期: 2004-09-05; 修订日期: 2004-10-11

\* 基金项目: 武汉市科技攻关计划项目(20021005130-01)

作者简介: 高劭宏(1959-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 主要研究波长可调谐半导体激光器。

begin to arise vary, which shows tunability. Meanwhile the current injected in the active region also varies when a main mode begins to arise. Threshold condition is also reflected using this method. Threshold current is 10 mA.

**Key words:** Tunable semiconductor lasers; Transfer matrix method; Sampled grating; DBR

## 0 引言

对于各种波分复用(WDM)系统和光包交换网络结构,宽带可调谐激光器是必不可少的元件。它既可以用作长距离的密集波分复用(DWDM)系统的替代光源,也可以用于接入网中的波长路由<sup>[1]</sup>。以往的可调谐半导体激光器采用分布反馈式结构(DFB)或分布布拉格反射器结构(DBR),调谐范围 $\Delta\lambda/\lambda$ 等于或小于光栅区的折射率变化 $\Delta\mu/\mu$ 。这就把 1.5  $\mu\text{m}$  附近的电调谐范围限制在 7 nm 左右。虽然利用热效应可以把这个范围扩大到 22 nm,仍然覆盖不了掺铒光纤放大器(EDFA)的放大带宽 30 nm<sup>[2]</sup>。如欲扩大调谐范围,需要加上外部光栅。可是由于外腔激光器采用机械调谐方法,稳定性比较差,所以不便于集成,且调谐和转换的速度较慢。近年,出现了一些结构新颖的宽带可调谐半导体激光器,如超结构光栅 DBR(SSGDBR)激光器<sup>[3,4]</sup>、光栅耦合取样反射器(GCSR)激光器和取样光栅 DBR(SGDBR)激光器<sup>[5-7]</sup>。其中,SGDBR 激光器比其他两种激光器制作相对简单,是商业上重点开发的对象。图 1 是 SGDBR 激光器的示意图。取样光栅是由传统光栅周期性地去除其中的一部分而形成的。这种周期性调制导致具有周期性最大值的反射率谱,即梳状周期性反射率谱,如图 2 所示。如果两个取样光栅的反射梳状谱周期稍微不同,那么两套反射率谱中只有一对反射率峰值在某一波长处是对齐的。这个位置也是两个反射率谱乘积取最大值的位置。那么激射也将发生在这个位置。如果一个取样光栅的折射率相对于另一个变化,那么相邻的反射率峰值将在另一个波长处对齐。这样,激射波长将在这些峰值中不连续地调谐。该现象很像游标尺。在这种情况下,波长的相对变化由 $\Delta n/n$ 与 $\Delta\lambda/\delta\lambda$ 的乘积来确定, $\Delta\lambda$ 表示单一取样光栅所产生的反射峰之间的间隔(这里取两个取样光栅情况的平均值),而 $\delta\lambda$ 表示两个取样光栅所产生的反射峰位置之间的差别。通过同步改变两个

光栅的折射率(必要时改变位相区的折射率),可以实现相邻峰值之间的连续调谐。这样就可以完整地覆盖整个谱的波长范围。

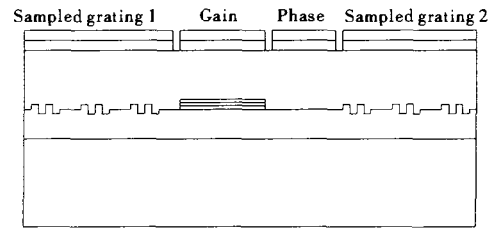


图 1 SGDBR 激光器的示意图

Fig.1 Schematic diagram of SGDBR lasers

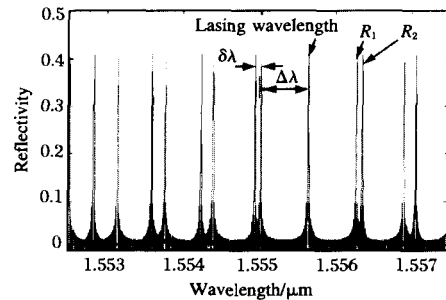


图 2 取样光栅的反射率谱示意图

Fig.2 Schematic diagram of reflectivity of sampled gratings

本文采用传输矩阵法(TMM)计算 SGDBR 激光器在阈值以下的自发发射谱。传输矩阵法最早应用于微波线路的研究,后来人们把这种方法用于激光器的研究。它的出发点是把一个结构用它的若干个基本单元来描述,而每一个基本单元都可以看作是一个普通的双端口器件。它的传输特性用一个 $2\times 2$ 复矩阵来表示。整个结构的传输特性也用一个 $2\times 2$ 复矩阵表示,但这个复矩阵等于各个单元的 $2\times 2$ 复矩阵乘积。例如,一个激光器端面、一个沟纹周期或一个位相偏移都可以看成基本单元。使用这种方法的目的并不是求解解析解,而是求数值解,因此它具有很多优点:首先,它不必求解耦合模方程。因为传统的耦合模方法是基于微扰近似,其应用仅限于相对浅的沟纹。如果界面

两端的折射率差很大,就不能看作微扰。而用传输矩阵法就不必假设弱耦合,强耦合同样也可以处理。而且它比耦合模方法更精确、简单;其次,适应性强,可以适用于几乎所有激光器结构,如 FP 腔、C<sup>3</sup> 腔 DFB 和 DBR 等结构或这些结构的组合。

### 1 数学模型

#### 1.1 数学模型的基础

为了计算 SGDBR 激光器的自发辐射谱,采用参考文献[8~10]所描述的传输矩阵法。在参考文献[8]中,利用传输矩阵法来描述多电极分布反馈式(DFB)激光器。这种方法的基本思想是把 DFB 激光器按电极的控制区段来划分,每一段的物理参数被认为是均匀的,并且用 2×2 基元矩阵来描述。

一个周期为  $\Lambda$  的光栅将两个具有波矢  $\pm K_0$  的波耦合起来。这时激光场可以表示为:

$$E=[A(z)\exp(iK_0z)+B(z)\exp(-iK_0z)]\phi(x) \quad (1)$$

式中  $A(z)$  和  $B(z)$  为  $z$  的缓变化函数; $\phi(x)$  为波导的基横模。对于 1 级光栅, $K_0=\pi/\Lambda$ 。

在图 3 所示的 DFB 结构中,DFB 两端的入射和

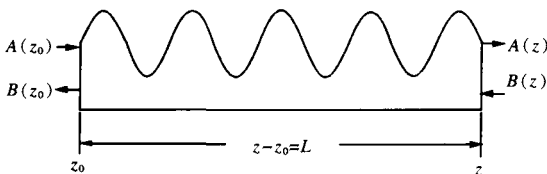


图 3 DFB 结构

Fig.3 DFB structure

出射的左行波  $B(z)$  和  $B(z_0)$  及右行波  $A(z_0)$  和  $A(z)$  之间的关系可以用矩阵表示:

$$\begin{bmatrix} A(z) \\ B(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A(z_0) \\ B(z_0) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中矩阵元为:

$$T_{11} = \frac{E-R^2 E^{-1}}{1-R^2} \quad (3)$$

$$T_{12} = -T_{21} = -R \left( \frac{E-E^{-1}}{1-R^2} \right) \quad (4)$$

$$T_{22} = -\frac{R^2 E-E^{-1}}{1-R^2} \quad (5)$$

在公式(3)~(5)中,

$$E = \exp[\gamma(z-z_0)] \quad (6)$$

$$R = -\frac{i\kappa}{\gamma+g_E+i\delta} \quad (7)$$

式中  $\kappa$  是光栅耦合系数; $\gamma$  是传播常数,由下式给出:

$$\gamma^2 = \kappa^2 + (g_E+i\delta)^2 \quad (8)$$

式中  $\delta$  是行波的波数  $\beta(\lambda_s)$  与 Bragg 波数  $\beta_0$  的偏离。

$$\delta = \beta(\lambda_s) - \beta_0 \quad (9)$$

$$\beta(\lambda_s) = \frac{2\pi n_{\text{eff}}}{\lambda_s}, \beta_0 = \frac{\pi}{\Lambda} \quad (10)$$

式中  $n_{\text{eff}}$  是有效折射率; $\lambda_s$  是信号光的波长。

$g_E$  是净场增益,它与功率增益及吸收的关系为:

$$g_E = \frac{\langle g \rangle_{xy} - \langle \alpha \rangle_{xy}}{2} \quad (11)$$

$$\langle g \rangle_{xy} = \Gamma_{xy} g \quad (12)$$

式中  $\Gamma_{xy}$  是横向限制因子。

对于多电极 DFB,可以用各段的矩阵乘积来分析整个多电极 DFB 的光谱特性。其分析过程详见参考文献[8]。

对于 SGDBR 激光器,也可根据物理参数为均匀的区段来划分,每一段也可用与单段 DFB 一样形式的 2×2 基元矩阵来描绘,而且可直接利用对 DFB 分析的结果。本文在计算过程中,假设吸收系数为零。

对于图 1 所示的 SGDBR 激光器的增益区, $\kappa=0, \beta_0=0$ 。由此得到: $\gamma^2=(g_E+i\delta)^2, \delta=\beta(\lambda_s), R=0, E=\exp[\gamma L_g], T_{11}=E, T_{12}=-T_{21}=0, T_{22}=E^{-1}$ 。其中, $L_g$  为增益区的长度。

对于位相区, $g_E=0, \kappa=0$ 。由此得到: $\gamma=\pm i\delta, \delta=\beta(\lambda_s), R=0, E=\exp[\pm i\beta(\lambda_s)L_p], T_{11}=E, T_{12}=-T_{21}=0, T_{22}=E^{-1}$ 。其中  $L_p$  为位相区的长度。

对于取样光栅 DBR,可以先按取样周期来划分区段。然后再把每个区段分成有光栅区和光栅被去除区,如图 4 所示。

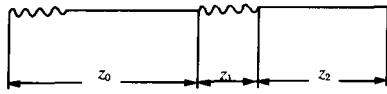


图 4 取样光栅的取样周期、光栅区及光栅被去除区

Fig.4 Sampled period, bust length and blank length of a sampled grating

在有光栅区,  $g_E=0$ 。由此得到:  $\gamma^2=\kappa^2-\delta^2$ ,  $\delta=\beta(\lambda_s)$   
 $-\beta_0$ ,  $R=-\frac{i\kappa}{\gamma+i\delta}$ ,  $E=\exp[\gamma L_b]$ 。其中  $L_b$  表示有光栅区  
 的长度。

在光栅被去除区,  $g_E=0$ ,  $\kappa=0$ 。由此得到:  $\gamma=\pm i\delta$ ,  
 $\delta=\beta(\lambda_s)$ ,  $R=0$ ,  $E=\exp[\pm i\beta(\lambda_s)L_{\text{blank}}]$ ,  $T_{11}=E$ ,  $T_{12}=-T_{21}=$   
 $0$ ,  $T_{22}=E^{-1}$ 。其中  $L_{\text{blank}}$  表示光栅被去除区的长度。

如果用  $T_b$  表示有光栅区的传输矩阵, 用  $T_{\text{blank}}$  表  
 示光栅被去除区的传输矩阵, 对于一个取样周期, 其  
 传输矩阵  $T_i$  可以表示为:

$$T_i = T_b T_{\text{blank}} \quad (13)$$

对于一个有  $S$  个取样周期长的取样光栅, 其传输  
 矩阵  $T_{\text{sg}}$  可以表示为:

$$T_{\text{sg}} = T_i^S \quad (14)$$

计算中, 对于有源区, 采用 InCaAsP 体材料抛物  
 线的能带结构, 并用  $k$  选择定则模拟其增益。对于无  
 源区, 假设载流子引起的折射率变化与载流子浓度  
 的变化成线性关系, 系数为  $-10^{-20} \text{ cm}^3$ 。这在阈值以下的  
 低电流下是成立的。在模拟中所采用的参数有: 左边  
 取样光栅中一个取样周期内有光栅刻纹的长度  $L_{b1}=$   
 $=3 \mu\text{m}$ ; 右边取样光栅中一个取样周期内有光栅刻纹  
 的长度  $L_{b2}=3 \mu\text{m}$ ; 光栅的耦合系数  $\kappa=250 \text{ cm}^{-1}$ ; 在无  
 载流子注入时的有效折射率  $n_{\text{eff}}=3.33$ ; 光学限制因子  
 $\Gamma=0.35$ ; 内量子效率  $\eta=0.8$ ; 无源区线性复合因子  
 $A_{nr1}=2.5 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ ; 有源区线性复合因子  $A_{nr2}=1 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ ;  
 无源区自发辐射复合因子为  $B_p=1 \times 10^{-16} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ; 有源区  
 自发辐射复合因子  $B_g=8 \times 10^{-17} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ; 无源区 Auger 复  
 合因子  $C_p=3 \times 10^{-41} \text{ m}^6 \text{ s}^{-1}$ ; 有源区 Auger 复合因子  $C_g=$   
 $1 \times 10^{-41} \text{ m}^6 \text{ s}^{-1}$ ; 波导横截面积  $S=1.2 \mu\text{m} \times 0.12 \mu\text{m}$ ; 左边  
 取样光栅总长度  $L_{\text{sg1}}=465 \mu\text{m}$ ; 右边取样光栅总长度  
 $L_{\text{sg2}}=500 \mu\text{m}$ ; 位相区长度  $L_p=100 \mu\text{m}$ ; 有源区长度

$L_g=270 \mu\text{m}$ ; 普通光栅的周期  $\Lambda=0.231 \mu\text{m}$ ; 左边取样  
 光栅的取样周期数  $s_1=10$ ; 右边取样光栅的取样周期  
 数  $s_2=10$ 。

## 1.2 阈值条件

由图 3 及公式(2)可知,

$$B(z) = T_{21} A(z_0) + T_{22} B(z_0) \quad (15)$$

在没有入射光波时, 仍有有限值的出射波, 可视为达  
 到了激射阈值。这时,  $A(z_0)=0$ ,  $B(z)=0$ , 由公式(15)可  
 知,  $T_{22}=0$ 。其中  $T$  是整个取样光栅激光器的传输矩  
 阵:

$$T = T_{\text{sg1}} T_g T_p T_{\text{sg2}} \quad (16)$$

式中  $T_{\text{sg1}}$  和  $T_{\text{sg2}}$  分别表示左边和右边取样光栅 DBR  
 的传输矩阵;  $T_g$  和  $T_p$  分别表示有源区和位相区的传  
 输矩阵。

通过计算得知, 当位相区和取样光栅无注入电流  
 时, 有源区的注入电流为  $10 \text{ mA}$  时,  $T_{22}$  开始为 0, 此  
 时可以认为达到阈值。

## 1.3 自发辐射谱的计算

利用参考文献[8]描述的方法可以计算阈值以下的  
 自发辐射谱。在忽略了 SGDBR 激光器的端面反射  
 率的情况下, 自发辐射功率可以写为:

$$P_m = h\nu n_{\text{sp}} \frac{\chi_m}{|T_{22}|^2} \quad (17)$$

式中  $\nu$  是光波的频率;  $n_{\text{sp}}$  是粒子数反转因子, 而

$$\chi_m = g \left\{ |c_m|^2 \left[ \frac{\exp(2\gamma_{\text{gr}} L_g) - 1}{2\gamma_{\text{gr}}} \right] + |d_m|^2 \left[ \frac{1 - \exp(-2\gamma_{\text{gr}} L_g)}{2\gamma_{\text{gr}}} \right] \right\} \quad (18)$$

$$c_1 = T_{r21} \quad (19)$$

$$d_1 = T_{r22} \quad (20)$$

$$c_2 = T_{i12} \quad (21)$$

$$d_2 = T_{i22} \quad (22)$$

$$\gamma_{\text{gr}} = \text{Re}(\gamma_g) \quad (23)$$

$$T_r = T_{\text{sg2}} T_p \quad (24)$$

$$T_i = T_{\text{sg1}} \quad (25)$$

式中  $\gamma_g$  是有源区的传播常数;  $T_i$  是有源区左边部分的  
 传输矩阵;  $T_r$  是有源区右边部分的传输矩阵。

### 2 模拟结果及分析

取样光栅的反射率为:

$$R = \frac{|T_{sg}(2, 1)|^2}{|T_{sg}(1, 1)|^2} \quad (26)$$

图 5 为在取样光栅无注入电流时利用传输矩阵法计算的取样光栅的反射率谱,它和用耦合模理论计算的结果是一致的<sup>[6]</sup>。

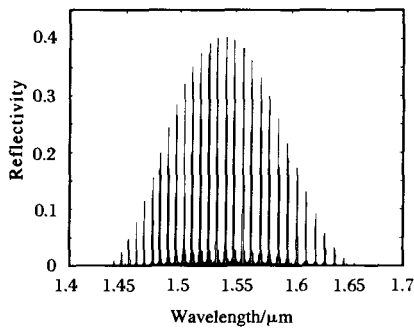


图 5 利用传输矩阵法计算的取样光栅的反射率谱

Fig.5 Reflectivity of a sampled grating calculated using TMM

图 6 为在取样光栅和位相区无注入电流、有源区的注入电流为 8 mA 时所计算的阈值下的取样光栅激光器的自发辐射谱,图(b)是图(a)的放大图。从图(b)可以看出,在波长大约为 1.500、1.507、1.514、1.520、1.527、1.534、1.541、1.548、1.556、1.564、1.571、1.579、1.586、1.593 和 1.601 μm 处,有凹陷的区域。这些凹陷的区域间隔和取样光栅的取样周期基本一致。从反映整个自发辐射谱的图 6(a)看,它具有与取样光栅的反射率谱相似的形状,说明输出的光谱受到取样光栅的调制。

随着有源区注入电流的增加,发射谱的峰值功率在增加,其形状也发生变化。图 7 是有源区的注入电流为 9.5 mA 时的自发辐射谱。可以看出,在接近阈值的情况下,主模开始在 1.553 μm 附近形成。

图 8~图 10 是有源区的注入电流分别为 8.5、8 和 8.5 mA, 左边取样光栅的注入电流分别为 1、2 和 3 mA、其他区域无注入电流时的自发辐射谱。可以看出,当取样光栅有注入电流时,主模开始形成的位置发生了变化,分别在 1.503、1.528 和 1.507 μm 附近,表现出可调谐的性质。同时,明显出现主模的有源区

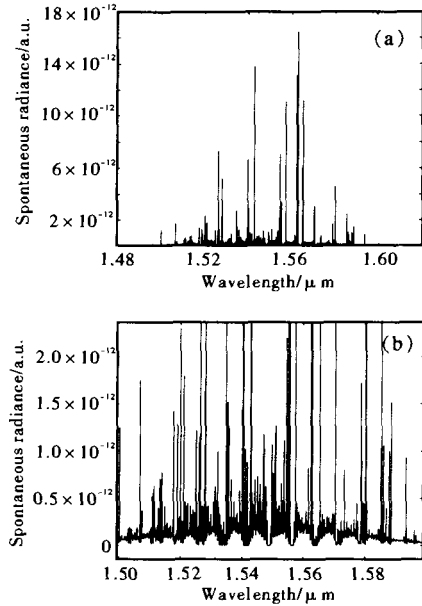


图 6 有源区的注入电流为 8 mA、其他区无注入电流时的自发辐射谱

Fig.6 Spontaneous radiation spectra when the current injected into the active region is 8 mA while there is no current in other regions

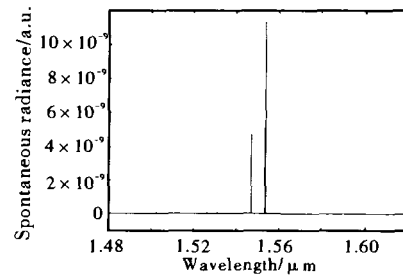


图 7 有源区的注入电流为 9.5 mA 时的自发辐射谱

Fig.7 Spontaneous radiation spectra when the current injected into the active region is 9.5 mA

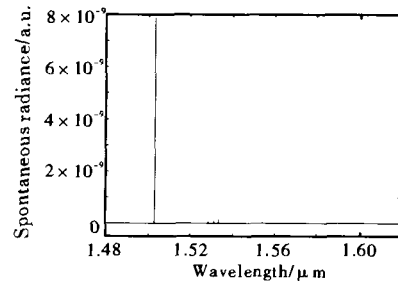


图 8 有源区的注入电流为 8.5 mA、左边取样光栅的注入电流为 1 mA 的自发辐射谱

Fig.8 Spontaneous radiation spectra when the currents injected into the active region and the left sampled grating are 8.5 mA and 1 mA respectively

的注入电流也发生变化。

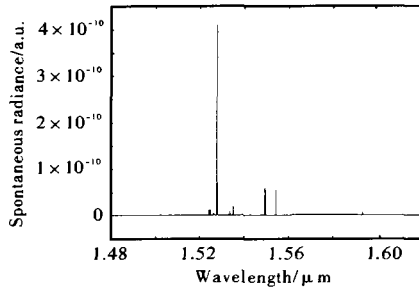


图 9 有源区的注入电流为 8 mA、左边取样光栅的注入电流为 2 mA 的自发辐射谱

Fig.9 Spontaneous radiation spectra when the currents injected into the active region and the left sampled grating are 8 mA and 2 mA respectively

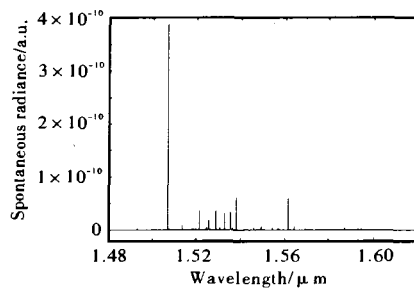


图 10 有源区的注入电流为 8.5 mA、左边取样光栅的注入电流为 3 mA 的自发辐射谱

Fig.10 Spontaneous radiation spectra when the currents injected into the active region and the left sampled grating are 8.5 mA and 3 mA respectively

### 3 结论

利用传输矩阵法模拟了取样光栅激光器阈值以下的自发辐射谱。虽然采用了简化的近似,但还是可以反映激光器的阈值条件和可调谐的特征。当位相区和取样光栅无注入电流时,有源区的注入电流为 10 mA 时,激光器达到阈值。在接近阈值的情况下(有源区的注入电流为 9.5 mA),主模在 1.553 μm 附近形成。从不同的注入电流下的发射谱看,有源区和取样光栅的注入电流都会影响光谱的输出特征。本模型是在阈值以下的情况下建立的。在这种情况下,可以忽略载流子浓度和光子密度之间的相互作用。为了使模型接近激光器的实际情况,下一步应该考虑阈值以上

的激光情况。这就需要在激光器速率方程中加入载流子和光子相互作用项。

### 参考文献:

- [1] Beck Mason, Greg A Fish, Steven P DenBaars, et al. Widely tunable sampled grating DBR laser with integrated electro-absorption modulator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1999, 11(6): 638-640.
- [2] Jayaraman V, Cohen D A, Coldren L A. Demonstration of broadband tunability in a semiconductor laser using sampled gratings[J]. Appl Phys Lett, 1992, 60(19): 2321-2323.
- [3] Tohmori Y, Yoshikuni Y, Ishii H, et al. Broad-range wavelength-tunable superstructure grating (SSG) DBR lasers[J]. Journal of Quantum Electronics, 1993, 29(6): 1817-1823.
- [4] Biemacki P D, Frankel M Y, Gingerich M E, et al. A high-speed mixed digital-to-analog circuit board for accurate control of wavelength tunable lasers for fiber-optic communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(7): 1222-1228.
- [5] Rigole P J, Nilsson S, Backbom L, et al. 114 nm wavelength tuning range of a vertical grating assisted codirectional coupler laser with a superstructure grating distributed Bragg reflector[J]. Photonics Technology Letters, 1995, 7(7): 697-699.
- [6] Jayaraman V, Chuang Z M, Coldren L A. Theory, design, and performance of extended tuning range semiconductor lasers with sampled gratings[J]. Journal of Quantum Electronics, 1993, 29(6): 1824-1834.
- [7] Mason B, Barton J, Fish G A, et al. Design of sampled grating DBR lasers with integrated semiconductor optical amplifiers[J]. Photonics Technology Letters, 2000, 12(7): 762-764.
- [8] Makino T, Glinski J. Transfer matrix analysis of the amplified spontaneous emission of DFB semiconductor laser amplifiers[J]. IEEE J Quantum Electron, 1988, 24(8): 1507-1518.
- [9] XU Wen-hai, YANG Ming-wei, TANG Wen-yan. Development of multifunctional laser diode driver[J]. Infrared and Laser Engineering (许文海, 杨明伟, 唐文彦. 多功能半导体激光器驱动电源的研制. 红外与激光工程), 2004, 33(5): 465-468.
- [10] LI Zhi-hong, HE Dui-yan, HE Lei. Power loss analysis of transitional waveguide by the finite difference beam propagation method[J]. Infrared and Laser Engineering (李志宏, 何对燕, 贺磊. 用有限差分光束传输法分析过渡波导损耗. 红外与激光工程), 2004, 33(1): 93-96.