

DOI:10.16136/j.joel.2022.09.0841

# 基于传输线激光器模型的调制光栅 Y 分支激光器仿真

胡欢鹏<sup>1</sup>, 梁磊<sup>1,2\*</sup>, 吴松<sup>3</sup>, 杜尚明<sup>3</sup>

(1. 武汉理工大学 光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070; 2. 武汉理工大学 信息工程学院, 湖北 武汉 430070; 3. 武汉理工大学 安全科学与应急管理学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 调制光栅 Y 分支激光器(modulated grating Y branch laser, MGY)是光纤光栅解调系统的理想光源,目前鲜有针对其调谐特性的建模研究,为研究 MGY 的调谐特性,本文将传输线激光器模型(transmission line laser model, TLLM)推广到模拟 MGY,采用 TLLM、传输矩阵法(transfer matrix method, TMM)与数字滤波方法相结合的组合模型对模拟 MGY 进行研究。在组合模型中,对增益区和相位区使用基于时域的 TLLM;对左、右调制光栅(left/right modulated grating, LMG/RMG)区先使用基于频域的 TMM 进行表征,然后通过反向傅里叶变换为时域模型,成功模拟了 MGY 的输出-电流特性曲线、静态调谐特性等,与已发表的实验结果相近。此综合方法可用于研究使用频域模型难以获得的器件的瞬态响应和激光光谱特性。

**关键词:** 调制光栅 Y 分支激光器(MGY); 传输线激光器模型(TLLM); 传输矩阵法(TMM); 综合仿真模型

**中图分类号:** TN248.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)09-0911-09

## Simulation of modulated grating Y-branch laser based on transmission line laser model

HU Huanpeng<sup>1</sup>, LIANG Lei<sup>1,2\*</sup>, WU Song<sup>3</sup>, DU Shangming<sup>3</sup>

(1. National Engineering Laboratory of Optical Fiber Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China; 2. School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China; 3. School of Safety and Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)

**Abstract:** A modulated grating Y-branch laser (MGY) is an ideal light source for fiber grating demodulation system. At present, there are few modeling studies on its tuning characteristics. In order to study the tuning characteristics of MGY, this paper extended the transmission line laser model (TLLM) to simulate MGY. The Y-type laser with analog modulated grating is studied by combining the TLLM, transmission matrix method (TMM) and digital filtering method. In the combined model, we use the TMM method based on time domain for the gain region and phase region. Firstly, the TMM based on frequency domain is used for the left and right modulated grating (LMG/RMG) regions, and then the inverse Fourier transform is used as the time domain model. The output current characteristic curve and static tuning characteristic of the MGY are simulated successfully, which is similar to the published experimental results. This comprehensive model can be used to study the transient response and laser spectra of devices that are difficult to obtain using frequency-domain models.

**Key words:** modulated grating Y-branch laser (MGY); transmission line laser model (TLLM); transmission matrix model (TMM); integrated simulation model

\* E-mail: L30L30@126.com

收稿日期: 2021-12-14 修订日期: 2021-01-20

基金项目: 三亚崖州湾科技城管理局 2019 和 2020 年度科技计划(SKJC-KJ-2019KY02, SKJC-2020-01-016)资助项目

## 1 引言

波长可调谐半导体激光器是光谱学和光纤光栅解调系统中的理想光源,是当今研究的热点课题之一<sup>[1,2]</sup>。波长可调谐半导体激光器主要包括分布式反馈激光器(distributed feedback,DFB)<sup>[3]</sup>、取样光栅分布布拉格反射激光器(sampled grating distributed Bragg reflection,SGDBR)<sup>[4]</sup>以及调制光栅Y分支激光器(modulated grating Y branch laser,MGY)<sup>[5]</sup>。MGY是基于两个多峰值反射光栅的游标效应,控制两次反射之间的相位差对输出波长进行调谐,MGY激光器表现出均匀的静态和动态性能以及高输出功率,输出功率可超过10 dBm,边模抑制比(side mode suppression ratio, SMSR)大于40 dB,调谐范围大于40 nm,调谐时间达纳秒级,已被应用于光谱学和光纤光栅传感解调等领域。

目前,国内外研究者对波长可调谐半导体激光器进行了大量研究。CHUNG等<sup>[6]</sup>利用分步时域建模方法模拟SGDBR激光器;刘帆基于传输线模型的综合仿真模型对MGY激光器和SGDBR激光器的相位噪声特性进行了模拟<sup>[7]</sup>。当前相关的研究主要集中在对SGDBR激光器的特性模拟,鲜有针对MGY激光器的调谐特性的仿真和光谱在线分析研究,研究MGY激光器的调谐特性对于MGY激光器的控制至关重要。为研究MGY激光器的特性,本文参考了LOWERY开发的传输线激光器模型(transmission line laser model, TLLM),TLLM模型是一种宽带、大信号动态激光模型,考虑了非均匀效应、多纵模和载流子引起的折射率变化和自发辐射噪声。此外,作为分布

式元件电路模型,电气寄生和匹配电路也是模型的一部分。TLLM已成功用于模拟分布布拉格反射激光器(distributed Bragg reflection,DBR)、SGDBR激光器和半导体光放大器。

针对MGY激光器,本文提出了一种TLLM、传输矩阵方法(transfer matrix method,TMM)与数字滤波相结合的模型。其中增益区和相位区易于在时域中描述,采用TLLM方法;MGY的左、右调制光栅的复杂结构难以在时域内模拟,因此采用一种频域模型-TMM方法对其进行描述,然后通过反向快速傅里叶变换(fast Fourier transform,FFT)和数字滤波方法转换为时域模型,使用有限脉冲响应(finite impulse response,FIR)滤波器作为连接装置,验证了时域-频域转换的有效性。本文以MGY激光器为对象,建立了基于TLLM和TMM的综合数学模型,基于此模型仿真了MGY激光器的静态动态特性,分析了其输出功率-电流(power-injection current, $P-I$ )特性,静态波长调谐特性及输出光谱特性。

## 2 基本原理

### 2.1 TLLM基本原理

如图1所示,TLLM是一个一维、宽带、大信号时域模型,它将激光腔沿纵向划分为若干个散射单元。TLLM使用散射矩阵来表示每个单元的光学过程,包括受激辐射、自发辐射和光损耗。激光腔内的群速度为 $v_{\text{group}}$ ,相邻单元之间用传输线连接,用于表示光场传输的时延。相邻单元之间的时延为:

$$\Delta T = \frac{\Delta L}{v_{\text{group}}}, \quad (1)$$

式中, $\Delta L$ 是相邻单元之间的距离,group表示粒

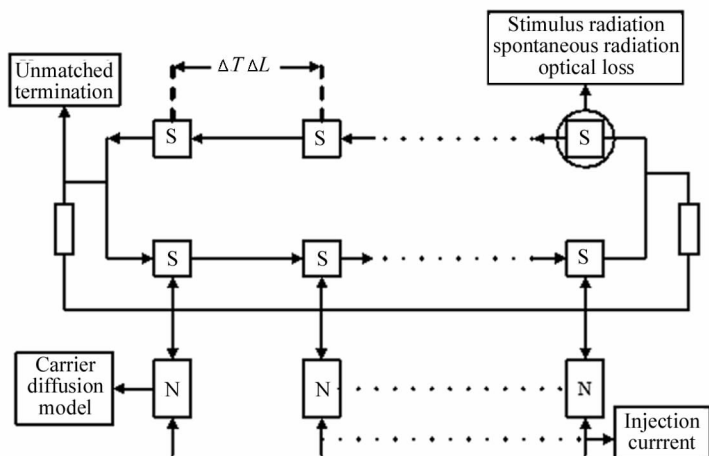


图1 MGY激光器传输线模型

Fig.1 Transmission line model of MGY laser

子群。

TLLM 使用连接矩阵  $C$  来表示相邻单元之间的连接过程。经过连续的散射和连接过程,可以得到时域输出光场。各部分采用独立载流子速率方程来表示载流子-光子相互作用。下文分别介绍散射矩阵、连接矩阵以及载流子密度速率方程。

## 2.2 增益区和相位区的 TLLM 建模

增益区模型采用两组传输线,一组表示入射波,另一组表示反射波。前一入射波经散射、反射而形成反射波。经过一段延迟后,反射波到达相邻节点并成为下一个散射节点的入射波。

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\gamma(1 + Z_{\text{SF}})} \begin{cases} \gamma(g + Y)(Z_{\text{SF}} - 1) & 2\gamma Y_{\text{C}} & 2\gamma Y_{\text{L}}(Z_{\text{SF}} - 1) & 2Y \\ g(Z_{\text{SF}} + 1) & (2Y_{\text{C}} - Y)(Z_{\text{SF}} + 1) & 2Y_{\text{L}}(Z_{\text{SF}} + 1) & 0 \\ g(Z_{\text{SF}} + 1) & 2Y_{\text{C}}(Z_{\text{SF}} + 1) & (2Y_{\text{L}} - Y)(Z_{\text{SF}} + 1) & 0 \\ 2Z_{\text{SF}}\gamma(g + Y) & 4\gamma Y_{\text{C}}Z_{\text{SF}} & 4\gamma Y_{\text{L}}Z_{\text{SF}} & Y(1 - Z_{\text{SF}}) \end{cases}, \quad (4)$$

式中,  $g$  为频率相关增益,由下式给出:

$$g = \exp(\Gamma g_{\text{M}} \cdot \frac{\Delta L}{2}) - 1, \quad (5)$$

$\gamma$  表示每个部分的波导衰减,由下式给出:

$$\gamma = \exp(-\alpha_{\text{sc}} \cdot \frac{\Delta L}{2}), \quad (6)$$

$Y$  是电阻电感电容(resistance, inductance and capacitance, RLC)滤波器的总导纳,由下式给出:

$$Y = Y_{\text{C}} + Y_{\text{L}} + 1, \quad (7)$$

式中,  $\Gamma$  是波导限制因子,  $g_{\text{M}}$  是材料增益,  $M$  表示材料,  $\alpha_{\text{sc}}$  是衰减因子,  $\text{sc}$  表示波导衰减,  $Z_{\text{SF}}$  是相移阻抗,  $\text{SF}$  表示相移,  $Y_{\text{C}}$  是容抗,  $C$  为电容,  $Y_{\text{L}}$  是感抗,  $L$  为电感。相移阻抗表示器件的相移效应,此相移是由相位传输线和主传输线之间的阻抗不匹配而产生的。相移阻抗归一化为腔波阻抗<sup>[9]</sup>,由式(8)给出:

$$Z_{\text{SF}} = \left| \cot(\pi \frac{\Delta L}{\lambda_0}) n_{\text{eff}} \right|, \quad (8)$$

式中,  $\lambda_0$  是激光器谐振波长,  $n_{\text{eff}}$  是有效折射率,  $\text{eff}$  表示有效值,  $\Delta L$  是截面上相长的变化,由下式给出:

$$\Delta L = \frac{\Delta L(N - N')}{n_{\text{group}}} \cdot \frac{dn}{dN}, \quad (9)$$

式中,  $N$  是零相移的任意载流子密度,  $N'$  为透明载流子密度,  $n_{\text{g}}$  是群折射率,  $dn/dN$  是折射率对载流子浓度的导数。散射过程可以表示为:

$$\begin{bmatrix} U(\omega) \\ U_{\text{C}}(\omega) \\ U_{\text{L}}(\omega) \\ U_{\text{P}}(\omega) \end{bmatrix}_{\text{re}} = \mathbf{S} \cdot \begin{bmatrix} U(\omega) \\ U_{\text{C}}(\omega) \\ U_{\text{L}}(\omega) \\ U_{\text{P}}(\omega) \end{bmatrix}_{\text{in}} + \begin{bmatrix} Z_{\text{SF}} L_{\text{sp}} \cdot \frac{\gamma}{2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{\text{sp}}, \quad (10)$$

式中,  $I_{\text{sp}}$  代表自发辐射的噪声电流<sup>[10]</sup>,  $U(\omega)$ 、 $U_{\text{C}}$

散射过程描述如下:

$$U_k(\omega)^{\text{re}} = \mathbf{S} \cdot U_k(\omega)^{\text{in}}. \quad (2)$$

对于增益节的建模,自发发射是必不可缺的,因此式(2)改写为:

$$U_k(\omega)^{\text{re}} = \mathbf{S} \cdot U_k(\omega)^{\text{in}} + U_k(\omega)^{\text{sp}}, \quad (3)$$

式中,  $\text{re}$  表示反射波,  $\text{in}$  表示入射波,  $\text{sp}$  表示自发发射,  $U_k(\omega)^{\text{re}}$  表示第  $k$  个时间步长从第  $\omega$  个散射节点的反射波,  $U_k(\omega)^{\text{in}}$  表示进入该节点的入射波,  $\mathbf{S}$  是散射矩阵,包括频率相关增益、衰减和模式耦合,  $U_k(\omega)^{\text{s}}$  表示自发发射,  $k$  为迭代次数。前向波在一个时间步长内的完整散射矩阵如式(4)所示<sup>[8]</sup>:

$(\omega)$ 、 $U_{\text{L}}(\omega)$  和  $U_{\text{P}}(\omega)$  分别是主传输线、电容短截线、电感短截线和相移短截线中的行波。每个散射过程的自发发射由一个单独的白噪声电流源表示,采用高斯(正态)分布噪声电流建模,具体为<sup>[11]</sup>:

$$I_{\text{sp}}^2 = \frac{2\sigma L h \nu B N^2 m^2}{Z_{\text{P}}}, \quad (11)$$

式中,  $\sigma$  是增益节自发辐射耦合系数,  $L$  是有源区的长度,  $h\nu$  是光子能量,  $B$  是双分子辐射复合系数,  $m$  是单位为米的常数。  $Z_{\text{P}}$  是波导中横电波(transverse electric mode, TE)模式的横波阻抗,  $P$  表示横波,  $Z_{\text{P}}$  由式(12)给出:

$$Z_{\text{P}} = \frac{120\pi n_{\text{g}}}{n_{\text{eff}}^2}. \quad (12)$$

TLLM 模型每个部分的载流子密度使用载流子密度速率方程的前向积分计算,即:

$$U_k(\omega)^{\text{in}} = \mathbf{C} \cdot U_k(\omega)^{\text{re}}, \quad (13)$$

式中,  $\mathbf{C}$  是连接矩阵,  $U_k(\omega)^{\text{in}}$  是入射波,  $U_k(\omega)^{\text{re}}$  是反射波。增益区和相位区的连接矩阵仅用于无反射地将一个部分与另一个部分连接。据此可以编写主传输线连接过程为:

$$\begin{pmatrix} U(\omega + 1) \\ V(\omega) \end{pmatrix}_{k+1}^{\text{in}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U(\omega) \\ V(\omega + 1) \end{pmatrix}_k^{\text{re}}, \quad (14)$$

对于每个传输线截面的电感性阻抗,连接过程为:

$$\begin{pmatrix} U_{\text{L}}(\omega) \\ V_{\text{L}}(\omega) \end{pmatrix}_{k+1}^{\text{in}} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{\text{L}}(\omega) \\ V_{\text{L}}(\omega) \end{pmatrix}_k^{\text{re}}, \quad (15)$$

对于每个传输线截面的电容性阻抗,连接过程为:

$$\begin{pmatrix} U_{\text{C}}(\omega) \\ V_{\text{C}}(\omega) \end{pmatrix}_{k+1}^{\text{in}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_{\text{C}}(\omega) \\ V_{\text{C}}(\omega) \end{pmatrix}_k^{\text{re}}. \quad (16)$$

对于电容性相移截面,其连接矩阵为二阶单位

矩阵。对于电感性相移截面,其连接矩阵是一个负的二阶单位矩阵。

### 2.3 载流子密度速率方程

有源区变化的载流子密度满足微分方程:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{J_d}{ed_a} - \frac{c}{n_g} g_N S_{op} - (AN + BN^2 + CN^3), \quad (17)$$

式中,  $J_d$  是注入电流密度,  $d$  表示注入电流,  $d_a$  是增益区厚度,  $a$  表示增益区,  $c$  是真空中光速,  $g_N$  是最大光增益,  $N$  为载流子浓度,  $A$  和  $C$  分别是非辐射线性复合系数和俄歇复合系数,  $S_{op}$  是光子密度,  $op$  表示光子。

令注入电流密度为:

$$J_d = \frac{\eta I}{S_a}, \quad (18)$$

式中,  $\eta$  是电流注入效率,  $I$  是电流注入强度,  $S_a$  是增益区波导截面积, 将载流子密度速率方程改写为:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\eta I}{eV_a} - \frac{c}{n_g} g_N S_{op} - (A_a N + B_a N^2 + C_a N^3), \quad (19)$$

式中,  $a$  表示增益区, 等式(19)右边第一项表示载流子密度都随注入电流增大的速率,  $e$  是自由电子电荷,  $V_a$  是增益区波导体积; 第二项表示载流子密度因受激复合减小的速率; 第三项表示载流子密度因自发复合减小的速率。

截面内的光子密度  $S_{op}$  与两侧入射波有关:

$$S_{op} = \frac{[U^i(\omega)^2 + V^i(\omega)^2] n_{eff}}{m^2 h \nu c Z_p}. \quad (20)$$

MGY 激光器增益区多量子阱 (multiple quantum well, MQW) 为分别限制异质结构, 其增益  $g_N$  可以用<sup>[12]</sup>来建模:

$$g_N = \frac{a(\ln N - \ln N')}{2(1 + \epsilon S_{op})}, \quad (21)$$

式中,  $a$  是微分增益系数,  $\epsilon$  是增益压缩因子。

对相位区的 TLLM 建模同样具有散射和连接过程, 因此对其 TLLM 建模与增益区的建模方法几乎相同。区别在于相位区没有受激发射, 只需要考虑注入电流和自发复合衰减的影响, 相位区的载流子密度速率方程为:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\eta I}{eV_a} - (A_a N + B_a N^2 + C_a N^3). \quad (22)$$

### 2.4 取样光栅节模型建立

MGY 激光器的调制光栅结构复杂, 左右调制光栅在时域上难以描述。为解决此问题, 首先利用 TMM 模型对左调制光栅 (left modulated grating, LMG) 和右调制光栅 (right modulated grating,

RMG) 进行频域表征, 然后通过数字滤波将其转换为时域。最后, 利用 TLLM 分析了 LMG 和 RMG 的高、低阻抗。图 2 为 MGY 激光器的基本结构图。

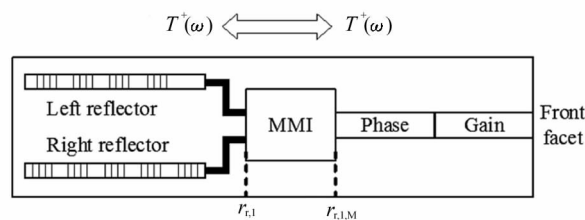


图 2 MGY 激光器基本结构图

Fig. 2 Basic structure diagram of MGY laser

如图 2 所示, MGY 激光器由增益区 (Gain)、相位区 (Phase) 和与 LMG/RMG 相连的多模干涉 (multimode interference, MMI) 耦合器组成<sup>[13]</sup>。参考平面 1 位于左右调制光栅反射器与 MMI 耦合器之间, 参考平面 2 位于 MMI 耦合器与相位区之间。对于应用于 MGY 激光器的 MMI 耦合器, 行波的横向尺寸要大于 MMI 耦合器的横向尺寸, 可以合理地假设波导中的各个位置的模式几乎具有相同的横向行为。参考平面的左右行波呈以下形式:

$$T^+(\omega) = r_{r,1}(N_l, N_r, \omega) T^-(\omega), \quad (23)$$

式中,  $+$  和  $-$  分别表示正向波导和反向波导,  $\omega$  为角频率,  $N_l$  和  $N_r$  分别为 LMG 和 RMG 的载流子密度,  $l$  和  $r$  分别表示左、右调制光栅。  $r_{r,1}$  为参考平面 1 上的有效反射系数。由图 2 可知,  $r_{r,1,M}$  为参考平面 2 上 LMG、RMG 和 MMI 耦合器的全反射系数,  $M$  表示 MMI 耦合器。

$$r_{r,1,M}(N_l, N_r, \omega) = T_M(\omega) \cdot r_{r,1}(N_l, N_r, \omega), \quad (24)$$

式中,  $T_M(\omega)$  为 MMI 耦合器的传递函数, 可通过导波传播分析方法 (method of guided wave propagation analysis, MPA) 得到。在模拟中, 选择了  $1 \times 2$  MMI 耦合器的宽度和长度分别为  $7 \mu\text{m}$  和  $53.5 \mu\text{m}$ 。传递函数只依赖于角频率。总增益曲线为:

$$g_{\text{Total}} = \frac{a(\ln N - \ln N')}{2(1 + \epsilon S)} - g_{\omega} \{ \omega - [\omega_{pk} + \frac{d\omega}{dN}(N - N')] \}^2, \quad (25)$$

式中,  $g_{\text{Total}}$  是总增益,  $\text{Total}$  表示总体,  $g_{\omega}$  是增益速率,  $\omega_{pk}$  是增益峰值角频率,  $pk$  表示增益峰值,  $d\omega/dN$  是增益峰值角频移系数。MGY 激光器各部分的折射率和内部损耗与载流子密度有关。

可调谐半导体激光器调谐的最基本原理是: 半导体材料的折射率随着注入载流子浓度的变化而变

化。折射率随载流子浓度变化的因素,在 MGY 激光器的调制光栅部分,根据能带填充、能带收缩和自由载流子等离子体效应,调制光栅部分的注入电流可以改变折射率  $n_R$  和内部吸收损耗  $\alpha^{[14]}$ ,  $R$  表示调制光栅区,其中能带填充效应的影响最大。光栅区有效折射率变化  $\Delta n_R$  和内部吸收损耗变化  $\Delta \alpha$  表示为:

$$\Delta n_R = \Gamma \cdot \frac{dn_R}{dN} N, \quad (26)$$

$$\Delta \alpha = \Gamma \cdot \frac{d\alpha}{dN} N, \quad (27)$$

式中,  $dn_R/dN$  是单位载流子浓度引起的折射率改变,  $d\alpha/dN$  是单位载流子浓度引起的内部吸收损耗变化。

将半导体的导带和价带等效为二能级系统,可写出调制光栅载流子密度速率方程:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\eta I}{e V_p} - (A_p N + B_p N^2 + C_p N^3), \quad (28)$$

式中,  $p$  表示无源区。对于 MGY 激光器的左右调制光栅区域,由于折射率的调制,前向波和后向波之间存在耦合。如图 3 所示,此效应可通过 TLLM 中传输线的阻抗转换来描述。

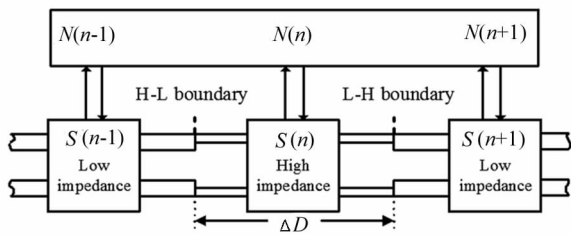


图3 MGY 激光器调制光栅区的 TLLM 建模

Fig. 3 TLLM of modulated grating region of MGY laser

LMG/RMG 采用两种不同矩阵交替连接的形式。对于高-低阻抗边界,连接过程为:

$$\begin{pmatrix} U(\omega) \\ V(\omega-1) \end{pmatrix}_{k+1}^{\text{in}} = \begin{pmatrix} 1 + \kappa \Delta D & -\kappa \Delta D \\ \kappa \Delta D & 1 - \kappa \Delta D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U(\omega-1) \\ V(\omega) \end{pmatrix}_k^{\text{re}}, \quad (29)$$

对于低-高阻抗边界,连接过程为:

$$\begin{pmatrix} U(\omega+1) \\ V(\omega) \end{pmatrix}_{k+1}^{\text{in}} = \begin{pmatrix} 1 - \kappa \Delta D & \kappa \Delta D \\ -\kappa \Delta D & 1 + \kappa \Delta D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U(\omega) \\ V(\omega+1) \end{pmatrix}_k^{\text{re}}, \quad (30)$$

式中,  $k$  是迭代次数,  $\kappa$  是每单位长度的光栅耦合。上述推导的综合仿真模型的原理图如图 4 所示。

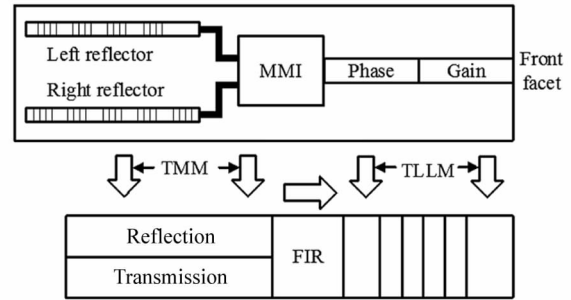


图4 MGY 激光器综合仿真模型原理

Fig. 4 Schematic of integrated simulation model for MGY laser

### 3 仿真分析和讨论

用于仿真的 MGY 激光器使用的参数定义如下:

首先,根据本文描述的仿真方法和表 1 所列的参数对 MGY 激光器进行了仿真。输出稳定的 MGY 激光器的光谱如图 5 所示。由图可知,激光器的谐振波长约为 1550 nm。

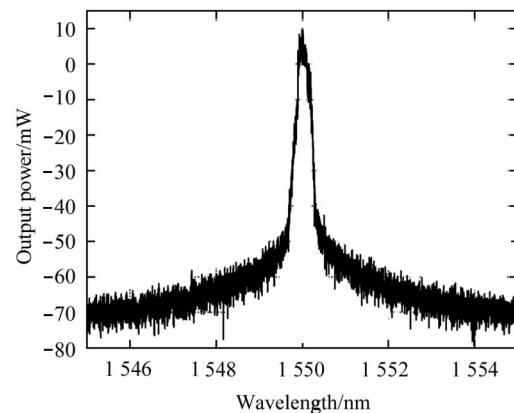


图5 MGY 激光器的仿真输出光谱

Fig. 5 Simulated output spectrum of MGY laser

然后,在增益区施加一个增量偏置电流,在相位区和调制光栅的 Y 分支区域不施加电流。增益区域的输出功率与偏置电流之间的关系如图 5(a) 所示。进行仿真时,需要多次迭代才能解决导通瞬态问题。

如图 6(a) 所示,增益区输出功率与偏置电流的关系曲线大致可以分为 3 个阶段:第一阶段激光器不产生激射,输出功率为 0,对应的偏置电流为 0—13.55 mA;第二阶段,激光器开始激射,功率随偏置电流线性增大,对应的偏置电流约为 13.55—21 mA;第三阶段,激光器增益区载流子浓度接近饱和,相应的偏置电流约为 21—100 mA,第三阶段增益增长的特征形式与对数增长类似。

最后,在输出功率随偏置电流线性增大阶段进

行了输出功率—电流关系的线性拟合,结果如图 6(b)所示,阈值电流为 13.55 mA,斜率约为 0.826 mW/mA。

为明确 MGY 激光器的调谐范围,本文模拟了左右调制光栅的反射光谱。通过调节左右两种调制光栅的采样周期,可以得到左右两种光栅不同峰值波长间隔的反射光谱,如图 7 所示。模拟的 MGY 激光

器的波长调谐范围约为 1 527—1 567 nm。为描述 LMG 和 RMG 截面的反射和透射特性,在 LMG/RMG 区使用 TMM 取其反射和透射系数,然后通过时域反射率和透射系数函数进行反向 FFT,就可以很容易地得到时域的 FIR 滤波器系数  $x(t)$ :

$$x(t) = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} X(v) e^{2\pi i j v \Delta t}, \quad (31)$$

表 1 MGY 激光器模拟中使用的参数定义

Tab. 1 Definition of parameters used in MGY laser simulation

| Symbol                                                        | Parameter name   | Value                  | Unit                  |
|---------------------------------------------------------------|------------------|------------------------|-----------------------|
| Resonance wavelength                                          | $\lambda_0$      | 1 550                  | nm                    |
| Gain-peak angular frequency shift coefficient                 | $d\omega/dN$     | $1.12 \times 10^{-11}$ | $\text{m}^3/\text{s}$ |
| Gain section length                                           | $l_G$            | 350                    | $\mu\text{m}$         |
| Phase section length                                          | $l_P$            | 80                     | $\mu\text{m}$         |
| Left modulated grating reflector length                       | $l_L$            | 530                    | $\mu\text{m}$         |
| Right modulated grating reflector length                      | $l_R$            | 530                    | $\mu\text{m}$         |
| Attenuation factor                                            | $\alpha_{sc}$    | 0                      | $\text{cm}^{-1}$      |
| Waveguide width                                               | $w$              | 1.2                    | $\mu\text{m}$         |
| Waveguide thickness                                           | Active           | 0.18                   | $\mu\text{m}$         |
|                                                               | Passive          | 0.23                   |                       |
| Waveguide loss                                                | $\gamma$         | 1 000                  | $\text{m}^{-1}$       |
| Waveguide confinement factor                                  | Active           | 0.2                    | —                     |
|                                                               | Passive          | 0.3                    |                       |
| Effective refractive index                                    | $n_{\text{eff}}$ | 3.23                   | —                     |
| Group refractive index                                        | $n_g$            | 3.7                    | —                     |
| Transparent carrier density                                   | $N'$             | $1.5 \times 10^{24}$   | $\text{m}^{-3}$       |
| Nonradiative linear composite coefficient                     | Active           | $1.5 \times 10^8$      | $\text{s}^{-1}$       |
|                                                               | Passive          | $1.68 \times 10^8$     |                       |
| Bimolecular compound coefficient                              | Active           | $4 \times 10^{-16}$    | $\text{m}^3/\text{s}$ |
|                                                               | Passive          | $2.8 \times 10^{-16}$  |                       |
| Auger compound coefficient                                    | Active           | $5 \times 10^{-41}$    | $\text{m}^6/\text{s}$ |
|                                                               | Passive          | $4 \times 10^{-41}$    |                       |
| Current injection efficiency                                  | $\eta$           | 0.8                    | —                     |
| Differential gain coefficient                                 | $a$              | $3 \times 10^{-16}$    | $\text{cm}^2$         |
| Gain compression factor                                       | $\epsilon$       | $2 \times 10^{-23}$    | $\text{m}^3$          |
| Derivative of refractive index to carrier density             | $dn_R/dN$        | $1.5 \times 10^{-26}$  | $\text{m}^3$          |
| Derivative of absorption coefficient to carrier density       | $d\alpha/dN$     | $1.5 \times 10^{-21}$  | $\text{m}^2$          |
| Spontaneous emission recombination coefficient in gain region | $\sigma$         | $1 \times 10^4$        | —                     |
| Gain curvature                                                | $g_\omega$       | $4.85 \times 10^{-24}$ | $\text{s}^2/\text{m}$ |
| Grating coupling of Unit length                               | $\kappa$         | 160                    | $\text{cm}^{-1}$      |

式中,  $x(v)$  是频域中 LMR/RMG 的反射率和透射率,  $M$  是滤波器系数。

输出光场或反射场可以用输入场  $y^n$  和特定时间  $i$  及更早时刻的反射率、透射率和 FIR 滤波器系数表示为:

$$F_{\text{out}}^n = \sum_{i=0}^M x^i(t) y^{(n-i)}. \quad (32)$$

当调整相位区域的电流时,输出波长随相位区

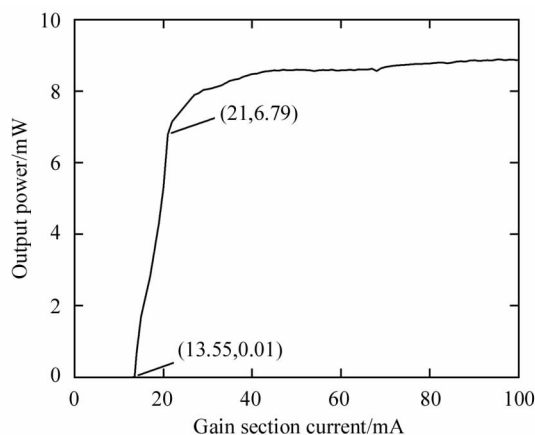
注入电流的变化曲线如图 8(a)所示。随着相位区电流的增加,输出波长持续减小,直到发生模式跳变。除了模式跳变部分外,相位区波长-电流调谐曲线呈线性,因此选择其中一部分线性区域进行线性拟合,结果如图 8(b)所示,与已发表的文献[15]中的描述一致。

为了解电流对 LMG 区和 RMG 区调制时波导

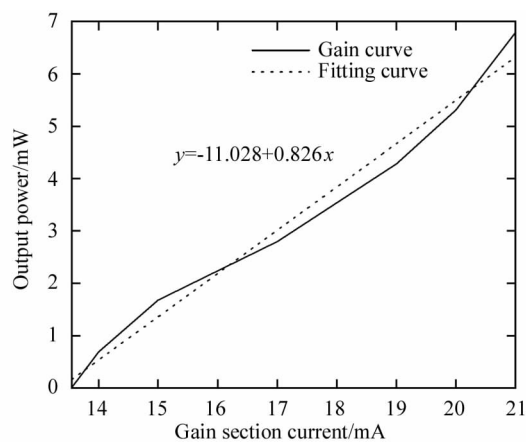
模式的输出,对 LMG 区和 RMG 区进行了一系列电流调制模拟。LMG 和 RMG 区域的输出波导模式分别如图 9(a)和图 9(b)所示。可以观察到,波长对电流的变化曲线呈阶梯状,每一个阶梯代表一个超模,

超模表示频谱中 LMG 和 RMG 区域的梳状反射峰显著对齐。

如图 8(a)和(b)所示,如果只调谐 LMG 和 RMG 区域,调谐范围无法达到 40 nm。



(a) P-I curve of MGY laser with stable output



(b) Fitting curve of linear growth of output power and injection current in laser gain region

图6 MGY激光器P-I特性曲线

Fig. 6 P-I characteristic curve of MGY laser

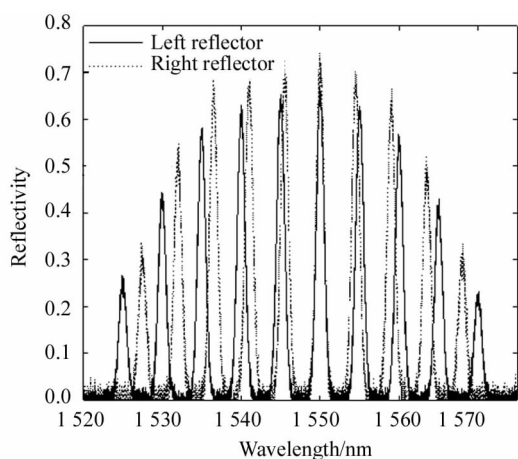
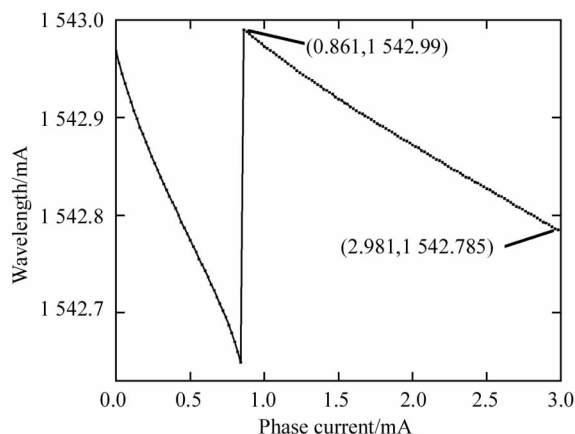
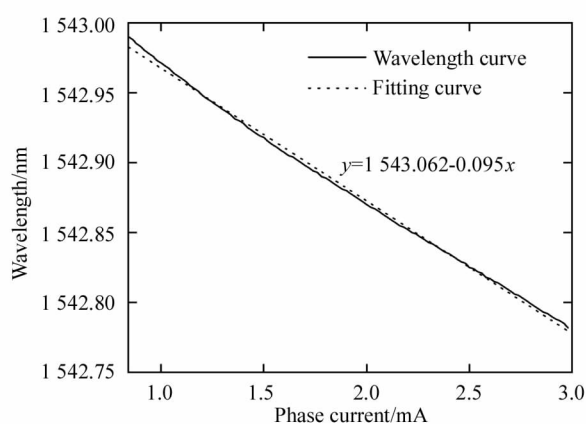


图7 左、右调制光栅反射谱图

Fig. 7 Reflection spectra of LMG & RMG



(a) Wavelength versus injection current in the phase region



(b) Linear fitting of wavelength versus injection current in the phase region

图8 波长-相位电流调谐曲线

Fig. 8 Wavelength-phase current tuning curve

由于增益区电流注入会导致增益饱和,因此 MGY 激光器的输出光功率是有限的。在实际应用中,通常使用半导体光放大器在激光器的输出端放大输出功率。如图 10 所示,MGY 激光器从 1520 到 1570 nm 的 6 种不同波长输出激光的经功率放大后输出光谱。调谐范围约为 40 nm。

## 4 结论

本文使用 TLLM 方法来模拟 MGY,对激光器的调制光栅 Y 分支和有源部分采用了不同的模拟方法。采用 TLLM 方法对 MGY 有源部分进行模拟;利用 MPA 得到 MMI 耦合器在波导传输中的传递函数;利用 TMM、TLLM 和数字滤波相结合的方法对

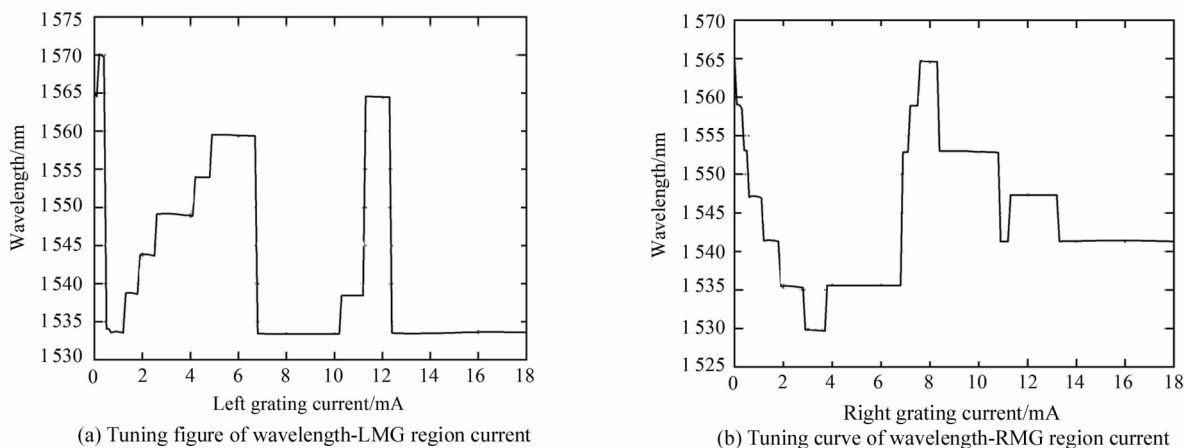


图9 波长-调制光栅区电流调谐图

Fig. 9 Tuning figure of wavelength-modulated grating region current

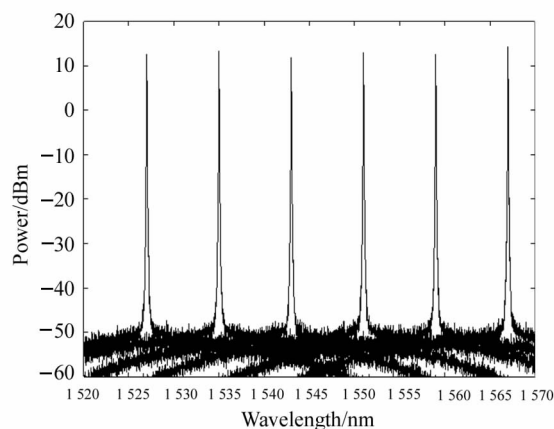


图10 激光器不同波长的输出光谱

Fig. 10 Output spectra of lasers with different wavelengths

MGY 进行模拟。成功模拟了 MGY 的  $P-I$  曲线、静态调谐特性和激光输出光谱,模拟结果与已发表的实验结果相近,该模拟方法可用于复杂效应光电器件的研究。

## 参考文献:

- [1] FAN J, GONG C Y, YANG J J, et al. Research progress of distributed Bragg reflector semiconductor lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(6): 060003.  
范杰, 龚春阳, 杨晶晶, 等. 分布布拉格反射器半导体激光器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(6): 060003.
- [2] CHU Q L, LIU K, JIANG J F, et al. The error analysis and compensation of fiber grating wavelength demodulation system based on tunable laser[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2018, 29(1): 14-21.
- [3] LU Z Y, XIONG B, LUO Y, et al. Design and research of miniaturized optical transmitter module based on the hybrid integration of semiconductor MZ modulator and DFB laser[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2021, 32(2): 181-185.  
卢致远, 熊兵, 罗毅, 等. 基于半导体 MZ 调制器与 DFB 激光器混合集成的小型化光发射模块的设计与研究[J]. 光电子·激光, 2021, 32(2): 181-185.
- [4] DU Z H, SUI G H, GAO C. Research on SGDBR light source used in fiber Bragg grating interrogator[J]. Metrology & Measurement Technology, 2017, 37(6): 15-19.  
杜泽翰, 隋广慧, 高超. 用于光纤光栅解调仪表的 SGDBR 光源研究[J]. 计测技术, 2017, 37(6): 15-19.
- [5] LIU Q, JING Z G, LI A, et al. Quasi-continuous tuning characteristics of modulated grating Y-branch laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(12): 1206004.  
刘强, 荆振国, 李昂, 等. 调制光栅 Y 分支激光器准连续调谐特性[J]. 中国激光, 2020, 47(12): 263-271.
- [6] CHUNG Y, OH S. H. Design and fabrication of widely tunable sampled grating DFB laser diode integrated with sampled grating distributed Bragg reflector[J]. Microwave & Optical Technology Letters, 2017, 59(2): 252-257.
- [7] LIU F, LIN Y, LIU Y, et al. Investigation into the phase noise of modulated grating Y-branch lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(6): 1-9.
- [8] FAN Y, LAMMERINK R, MAK J, et al. Spectral linewidth analysis of semiconductor hybrid lasers with feedback



- from an external waveguide resonator circuit[J]. Optics Express, 2017, 25(26): 32767-32782.
- [9] CUI Z T, SUN D Y, MAO C G. MTL model of capacitive pulse interference coupling device[J]. Journal of Xidian University, 2017, 44(2): 140-144+150.  
崔志同, 孙东阳, 毛从光. 容性脉冲干扰耦合装置的多导体传输线模型[J]. 西安电子科技大学学报, 2017, 44(2): 140-144+150.
- [10] TAO J, WANG X, SUN H X, et al. A method of generating and implementing narrow-band Gaussian white noise[J]. Telecom. World, 2017(23): 350-351.  
陶杰, 王欣, 孙慧贤, 等. 一种窄带高斯白噪声的生成与实现方法[J]. 通讯世界, 2017(23): 350-351.
- [11] ZHONG C Y, ZHANG X, Yu L J, et al. Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers With Two Emission-Controllable Transverse Modes[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(21): 1840-1843.
- [12] YANG W K, WANG H L, CAO C F, et al. Fabrication and performance test of 2.0  $\mu\text{m}$  mid-infrared quantum well lasers[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2018, 29(9): 933-937.  
杨维凯, 王海龙, 曹春芳, 等. 2.0  $\mu\text{m}$  中红外量子阱激光器研制及其性能测试与分析[J]. 光电子 • 激光, 2018, 29(9): 933-937.
- [13] QIU C, CHEN Y Y, GAO F, et al. Development of a multi-mode interference waveguide semiconductor laser combined with a gain-coupled distributed feedback grating[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(16): 164204.  
邱橙, 陈泳屹, 高峰, 等. 一种结合增益耦合分布反馈光栅的多模干涉波导半导体激光器的研制[J]. 物理学报, 2019, 68(16): 218-227.
- [14] DUZGOL O, KYRITSIS G, ZAKHLENIUK N. Travelling-wave modelling of the modulation dynamic performance of wavelength-tunable laser diodes using the integrated VPI and PICS3D software [J]. Let Optoelectronics, 2017, 11(2): 66-72.
- [15] ZHENG S H, YANG Y H. High precision and accuracy wavelength tuning characteristics of modulated grating Y-branch tunable lasers[J]. Journal of Chinese Lasers, 2019, 46(2): 0201001.  
郑胜亨, 杨远洪. 调制光栅Y分支可调谐激光器高精度波长调谐特性[J]. 中国激光, 2019, 46(2): 0201001.

#### 作者简介:

梁 磊 (1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事新型光纤传感器及信息处理、光纤智能材料与结构和基于光纤传感的大型装备与结构的安全监测与预警方面的研究。