

光纤光栅外腔半导体激光器噪声特性仿真

王直圆^{1,2}, 陈超^{1*}, 单肖楠¹, 秦莉¹, 张星¹, 陈泳屹¹, 梁磊¹, 贾鹏¹, 宁永强¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于激光器的增益理论和动态理论, 结合经典的激光器速率方程, 分析了激光器有源区尺寸、光纤光栅结构、耦合效率和注入电流等参数对频率噪声和弛豫振荡频率的影响。以获得低频率噪声和高弛豫振荡频率为目标, 进行数字仿真, 仿真结果表明, 较小的激光器有源区尺寸、较强的外腔光反馈和较高的注入电流有利于改善噪声特性, 其中注入电流的影响尤为重要。当注入电流为阈值电流的9倍时, 频率噪声降低约14.7%, 弛豫振荡频率增加约6.0 GHz。

关键词 激光器; 半导体激光器; 外腔; 光纤光栅; 频率噪声; 弛豫振荡频率

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.011401

Simulation of Noise Characteristics of Fiber Grating External Cavity Lasers

Wang Zhiyuan^{1,2}, Chen Chao¹, Shan Xiaonan¹, Qin li¹, Zhang Xing¹, Chen Yongyi¹,
Liang Lei¹, Jia Peng¹, Ning Yongqiang¹

¹ State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Based on the gain theory and the laser dynamic theory of laser, the effects of laser active region size, fiber grating structure, coupling efficiency and injection current on frequency noise and relaxation-oscillation frequency are analyzed, when we combine with the classical laser rate equation. To obtain low frequency noise and high relaxation oscillation frequency, a simulation is conducted. The simulation results show that a small laser active region size, a strong external cavity light feedback and a high injection current are beneficial to the improvement of noise characteristics, and the influence of injection current is especially important. When the injection current is 9 times higher than the threshold current, the frequency noise reduces by 14.7%, and the relaxation oscillation frequency increases about 6.0 GHz.

Key words lasers; semiconductor lasers; external cavity; fiber grating; frequency noise; relaxation oscillation frequency

OCIS codes 140.5960; 140.3410; 060.3735; 140.3518

1 引言

在以密集波分复用系统为代表的相干光通信领域, 为实现远距离、大容量、低误码率、高接收灵敏度的传输, 需要使用具有极低频率/相位噪声、超窄频谱线宽和高调制频率的激光光源^[1-3]。激光器的载流子噪声和

收稿日期: 2016-08-18; 收到修改稿日期: 2016-09-09; 网络出版日期: 2016-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(61505206, 61234004, 61434005, 61306086)、吉林省科技计划项目(20150520089JH)

作者简介: 王直圆(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事低噪声、窄线宽激光器方面的研究。E-mail: 398337862@qq.com

导师简介: 单肖楠(1979—), 男, 博士, 研究员, 主要从事半导体激光技术及应用等方面的研究。

E-mail: shanxn@ciomp.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: chenc@ciomp.ac.cn

固有相位噪声是频率噪声的主要来源,并决定激光线宽^[4]。现有的低噪声窄线宽激光器主要包括集成分布反馈式^[5]或分布布拉格反射(DBR)光栅^[6-7]的单片集成式结构,以及由 Fabry-Perot 腔标准具^[8]、光栅^[9-13]、硅基光子芯片^[14-15]和回音壁模式谐振腔(WGM)^[16]等构成的外部光反馈外腔结构。Reddy 等^[5]提出了一种表面刻蚀高阶光栅(周期为 50 μm)的 DBR 激光器,其线宽为 220 kHz;Alalusi 等^[15]采用波导光栅外腔结构制备了低噪声、窄线宽半导体激光器,线宽为 2.6 kHz;Liang 等^[16]采用 WGM 外腔制作了百赫兹量级线宽、超低噪声微型半导体激光器。在众多研究中,光纤布拉格光栅外腔半导体激光器(FBG-ECSL)因具有结构简单、成本低廉、直接调制啁啾小、易于获得千赫兹量级窄线宽和低噪声激光的特点而备受关注^[9-13,17-20]。江路芸等^[10]设计了可调的外加光反馈系统,分析了不同外腔光反馈对激光器线宽和噪声强度的影响。Premaratne 等^[17]针对 FBG 外腔激光器的静态和小信号调制情况,运用 Volterra 函数的级数展开方法分析了封装寄生效应、泄漏电流产生的畸变等对噪声强度和调制特性的影响。Loh 等^[18]将平板耦合波导光放大器与窄带宽 FBG 谐振腔耦合,制作了高功率(370 mW)、窄线宽(1 kHz)、低噪声外腔激光器。Bartolo 等^[19]通过抑制低频部分的 $1/f$ (f 为频率)噪声,实现了窄线宽、低相位噪声的 FBG-ECSL。上述研究主要针对 FBG-ECSL 线宽和噪声强度进行了实验分析,鲜有从理论上系统研究激光器参数对频率/相位噪声和弛豫振荡频率的影响。

本文结合激光器频率噪声和弛豫振荡频率^[4],运用激光器外腔光反馈理论和动态理论数值仿真,通过改变增益芯片和外腔参数,保证激光器获得低频率噪声的同时提高弛豫振荡频率,从而获得更具应用价值的低噪声、窄线宽激光光源。数值仿真表明,降低增益芯片的有源区尺寸、增强外部光反馈和提高注入电流均有利于抑制激光器频率噪声和提高弛豫振荡频率。其中,注入电流的影响尤为重要,当注入电流为阈值电流的 9 倍时,频率噪声降低约 14.7%,弛豫振荡频率增加约 6.0 GHz。本文研究可为低噪声、窄线宽 FBG-ECSL 的制备提供重要的理论指导,在空间相干光通信、微波光子学和高精密光学传感等领域具有广阔的应用前景^[1-3]。

2 器件原理

典型的 FBG-ECSL 由增益芯片、光纤外腔和 FBG 三部分构成,如图 1(a)所示。增益芯片的前后腔面分别镀有增透膜和高反膜,其反射率分别为 R_0 和 R_1 。有源区长度为 L_d ,光纤外腔长度为 L_{ext} ,光栅长度为 L_{FBG} ,光栅反射率为 R_{ext} 。图 1(b)为外腔激光器的等效腔理论模型^[21-22],将增益芯片内腔和光纤外腔简化为一个激光器有源区,其有效反射率 R_{eff} 可表示为^[11, 13, 21]

$$R_{\text{eff}} = \frac{R_0^2 + R_{\text{OFB}}^2 + 2R_0R_{\text{OFB}}\cos(\omega\tau_e)}{1 + R_0^2R_{\text{OFB}}^2 + 2R_0R_{\text{OFB}}\cos(\omega\tau_e)}, \quad (1)$$

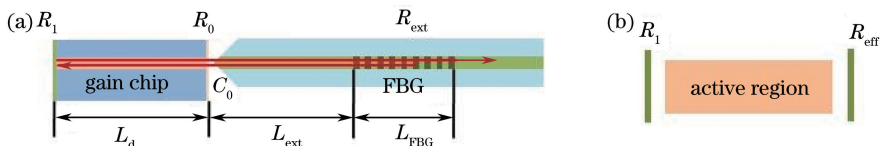


图 1 FBG-ECSL 的 (a) 结构示意图和 (b) 理论模型

Fig. 1 (a) Structural schematic and (b) theoretical model of FBG-ECSL

式中 R_{OFB} 为考虑与增益芯片耦合的反射率, $R_{\text{OFB}} = C_0R_{\text{ext}}$, 其中 C_0 为增益芯片与光纤外腔的耦合系数; τ_e 为光子在外腔的往返时间, $\tau_e = 2L_{\text{ext}}n_{\text{ext}}/c$, 其中 c 为光速, n_{ext} 为光纤外腔折射率。FBG 的反射率 R_{ext} 可表示为^[23]

$$R_{\text{ext}} = \begin{cases} \frac{k^2 \sinh^2(SL_{\text{FBG}})}{\delta\beta^2 \sinh^2(SL_{\text{FBG}}) + S^2 \cosh^2(SL_{\text{FBG}})} & k^2 > \delta\beta^2 \\ \frac{k^2 \sin^2(QL_{\text{FBG}})}{\delta\beta^2 - k^2 \cos^2(QL_{\text{FBG}})} & k^2 < \delta\beta^2 \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $S = \sqrt{k^2 - \delta\beta^2}$, $Q = iS = \sqrt{\delta\beta^2 - k^2}$, 二者由失谐波矢量的大小 $\delta\beta$ 和耦合强度 k 决定。

2.1 阈值电流特性

针对 FBG-ECSL 的外腔光反馈结构,考虑到光学反馈和温度的影响,激光器的阈值电流可表示为^[4,20,23-25]

$$I_{\text{th,OFB}}(T) = eVN_{\text{th,OFB}}(T) [A_{\text{nr}} + BN_{\text{th,OFB}}(T) + C^2N_{\text{th,OFB}}(T)], \quad (3)$$

式中 e 为电子电荷, V 为有源区的体积, A_{nr} 、 B 、 C 分别为非辐射复合率、辐射复合率、俄歇复合率, $N_{\text{th,OFB}}(T)$ 为考虑光学反馈和温度时激光器的阈值载流子浓度^[4,21,24], 可表示为

$$N_{\text{th,OFB}}(T) = N_{\text{t}}(T) + [\Gamma v_{\text{g}} a(T) \tau_{\text{p,OFB}}(T)]^{-1}, \quad (4)$$

式中 Γ 为限制因子, v_{g} 为群速度, $N_{\text{t}}(T)$ 为透明载流子浓度, $a(T)$ 为增益系数, $\tau_{\text{p,OFB}}(T)$ 为光子寿命。 $N_{\text{t}}(T)$ 、 $a(T)$ 、 $\tau_{\text{p,OFB}}(T)$ 均符合线性关系 $X(T) = X_0 + (T - T_0) \partial X / \partial T$, 其中 X_0 为对应物理量在温度为 T_0 时的标准值, T_0 为室温。 $\tau_{\text{p,OFB}}(T)$ 为受温度和外腔反馈影响的光子寿命, 可表示为 $\tau_{\text{p,OFB}}(T) = 1 / [v_{\text{g}} \alpha_{\text{tot,OFB}}(T)]$ ^[4,21]。 $\alpha_{\text{tot,OFB}}(T)$ 为激光器腔内的总损耗, 可表示为

$$\alpha_{\text{tot,OFB}}(T) = \alpha_{\text{int}}(T) + \frac{1}{2L_{\text{d}}} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_{\text{eff}}} \right), \quad (5)$$

式中 $\alpha_{\text{int}}(T)$ 为由温度决定的损耗因子, $\frac{1}{2L_{\text{d}}} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_{\text{eff}}} \right)$ 为镜面损耗。 经分析可得, 激光器的阈值载流子浓度 $N_{\text{th,OFB}}(T)$ 可改写为^[24-26]

$$N_{\text{th,OFB}}(T) = \frac{\left\{ \alpha_{\text{int}}(T) + \frac{1}{2L_{\text{d}}} \ln \frac{1 + 2R_0 R_{\text{OFB}} \cos(\omega \tau_{\text{e}} - \theta_{\text{ref}}) + R_0^2 R_{\text{OFB}}^2}{R_1 [R_0^2 + 2R_0 R_{\text{OFB}} \cos(\omega \tau_{\text{e}} - \theta_{\text{ref}}) + R_{\text{OFB}}^2]} \right\}}{a(T) \Gamma}, \quad (6)$$

式中 θ_{ref} 为反射光的相位系数。 分析激光器的阈值载流子浓度和阈值电流, 并结合动态速率方程进一步分析激光器的频率噪声特性。

2.2 频率噪声特性

因受外界条件的影响, 激光器工作时的载流子数、光子数和出射光相位将不可避免地随时间变化产生波动。 不同的噪声源用 $F_i(t)$ 表示, 包括载流子数 $N(t)$ 、光子数 $S(t)$ 和光学相位 $\phi(t)$ 。 在考虑外腔光反馈和温度的情况下, 引入耦合速率方程^[4,21,24-26]:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{I(t)}{q} - \frac{N(t)}{\tau_{\text{c,OFB}}} - g \frac{N(t) - N_0}{1 + \epsilon S(t)} S(t) + F_N(t), \quad (7)$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = g \frac{N(t) - N_0}{1 + \epsilon S(t)} S(t) - \frac{S(t)}{\tau_{\text{p,OFB}}} + R_{\text{sp,OFB}} + F_S(t), \quad (8)$$

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{1}{2} \alpha G_N [N(t) - \bar{N}] + \frac{\arg(R_{\text{ext}})}{\tau_{\text{d}}} + F_{\phi}(t), \quad (9)$$

式中 $I(t)$ 为注入电流, $\tau_{\text{c,OFB}}$ 为载流子寿命 ($\tau_{\text{c,OFB}} = eVN_{\text{th,OFB}}/I_{\text{th,OFB}}$), g 为增益系数, ϵ 为非线性增益压缩因子, $R_{\text{sp,OFB}}$ 为自发辐射对发光的贡献 ($R_{\text{sp,OFB}} = \eta_{\text{sp}} \beta_{\text{sp}} N / \tau_{\text{c,OFB}}$, 其中 β_{sp} 为自发辐射因子, η_{sp} 为自发量子效率), α 为线宽展宽因子, $G_N = \Gamma v_{\text{g}} g / V$, \bar{N} 为载流子数的时间平均。 $F_i(t)$ 为引入的郎之万噪声源, 是符合高斯随机分布的变量, 不同噪声源之间的关系可以表示为^[4,21,24-26]

$$\langle F_i(t) \rangle = 0, \quad \langle F_i(t), F_j(t') \rangle = 2D_{ij} \delta(t - t'), \quad (10)$$

式中 $F_i(t)$ 、 $F_j(t')$ 分别为时间 t 、 t' 时的噪声源, $\delta(t - t')$ 为狄拉克函数。 当 $i = j$ 时, D_{ij} 为自相关强度; 当 $i \neq j$ 时, D_{ij} 为互相关强度。 当其中一个噪声源的波动与另外一个噪声源的波动相关时, D_{ij} 才有意义。 载流子数 $N(t)$ 、光子数 $S(t)$ 和光学相位 $\phi(t)$ 之间的相关度可表示为

$$\begin{aligned} D_{SS} &= R_{\text{sp,OFB}} S, & D_{NN} &= R_{\text{sp,OFB}} S + \frac{1}{\tau_{\text{c,OFB}}} N(t), \\ D_{SN} &= -\frac{1}{2} R_{\text{sp,OFB}} S, & D_{S\phi} &= D_{N\phi} = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

对速率方程作傅里叶变换, 得到载流子数、光子数、相位在频域的表达式, 激光器的频率噪声 $\nu(t)$ 与相位 $\phi(t)$ 之间满足 $\nu(t) = 1/2\pi \cdot d\phi(t) / dt$ 。

激光器的频率噪声谱密度由载流子噪声和固有相位噪声两部分组成, 两者不相关。 因此, 频域的频率噪声可表示为^[4]

$$S_v(\omega) = \left[\frac{\alpha}{4\pi} \Gamma v_g a(T) \right]^2 S_N(\omega) + \frac{1}{2\pi^2} \langle F_\phi F_\phi \rangle, \quad (12)$$

式中 $S_N(\omega)$ 为载流子噪声谱密度, 可表示为

$$S_N(\omega) = \frac{8\pi}{[\Gamma v_g a(T)]^2} \left(\frac{\Gamma R_{sp}}{4\pi S} \right) |H(\omega)|^2, \quad (13)$$

式中 $H(\omega)$ 为调制传递函数, $H(\omega) = \omega_R^2 / (\omega_R^2 - \omega^2 + j\omega\gamma)$; γ 为阻尼因子; ω_R 为限制调制频率上限的弛豫谐振频率, 可表示为

$$\omega_R^2 = v_g a_0 S / [\tau_p (1 + \epsilon S)]. \quad (14)$$

3 模拟结果与分析

基于上述激光器频率噪声和弛豫振荡频率的理论分析进行数值仿真。选取的激光器波长为 1550 nm, 其他重要参数如表 1 所示。

表 1 FBG-ECSL 的模拟参数(25 °C)

Table 1 Simulation parameters of FBG-ECSL at 25 °C

Parameter	Description	Parameter	Description
$L_d = 250 \mu\text{m}$	Active region length	$C_0 = 0.9$	Coupling coefficient
$d = 0.1 \mu\text{m}$	Active region thickness	$n_d = 4$	Group refractive index
$w = 2 \mu\text{m}$	Active region width	$a_0 = 2.5 \times 10^{-20} \text{ m}^2$	Differential gain
$N_0 = 1 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$	Transparency carrier density	$\alpha = 5$	Linewidth enhancement coefficient
$A_{nr} = 1 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$	Nonradiative recombination coefficient	$\beta_{sp} = 1 \times 10^{-5}$	Spontaneous-emission factor
$B = 1 \times 10^{-16} \text{ m}^3/\text{s}$	Radiative recombination coefficient	$I_{inj} = 100 \text{ mA}$	Injection current
$C = 3 \times 10^{-41} \text{ m}^6/\text{s}$	Auger recombination coefficient	$n_{ext} = 1.44$	Fiber refractive index
$\alpha_{int} = 1000 \text{ m}^{-1}$	Internal cavity loss	$L_{ext} = 5 \text{ cm}$	External cavity grating length
$\Gamma = 0.34$	Field confinement factor	$L_{FBG} = 4 \text{ mm}$	Grating length
$R_1 = 0.9$	Reflectivity of left facet	$k = 5 \text{ cm}^{-1}$	Coupling strength parameter
$R_0 = 0.1$	Reflectivity of right facet	$R_{ext} = 0.1$	Reflectivity of FBG
$\epsilon = 1 \times 10^{-17} \text{ cm}^3$	Nonlinear gain compression factor	$g = 3.6 \times 10^3 \text{ cm}^3/\text{s}$	Gain slope constant coefficient
$a_p = 2.37 \times 10^{-18} \text{ m}^2$	Differential gain considering of photon density		

根据表 1 数据, 运用 Matlab 进行模拟, 系统分析了 FBG-ECSL 各参数对激光器频率噪声功率谱密度的影响。

增益芯片有源区的特征尺寸影响载流子在腔内的往返时间和增益芯片的损耗, 进而影响激光器的阈值载流子浓度和阈值电流, 因此增益芯片有源区的特征尺寸是影响激光器工作性能的重要参数。首先从有源区的长度、宽度和厚度三个方面对激光器的频率噪声特性进行数值模拟, 三者对激光器频率噪声功率谱密度的影响如图 2 所示。 L_d 分别取 250, 500, 750 μm , d 分别取 0.05, 0.10, 0.15 μm , w 分别取 2, 4, 6 μm 。

由图 2(a)~(c)可知, 随着有源区特征尺寸的减小, 激光器频率噪声逐渐减小, 弛豫振荡频率逐渐增大。这是因为较小的有源区体积缩短了载流子在腔内的往返时间, 减小了腔内损耗, 从而减小了阈值载流子浓度和阈值电流, 因此在相同注入电流条件下得到的光子数增多, 自发辐射产生的影响相对减小, 频率噪声得到

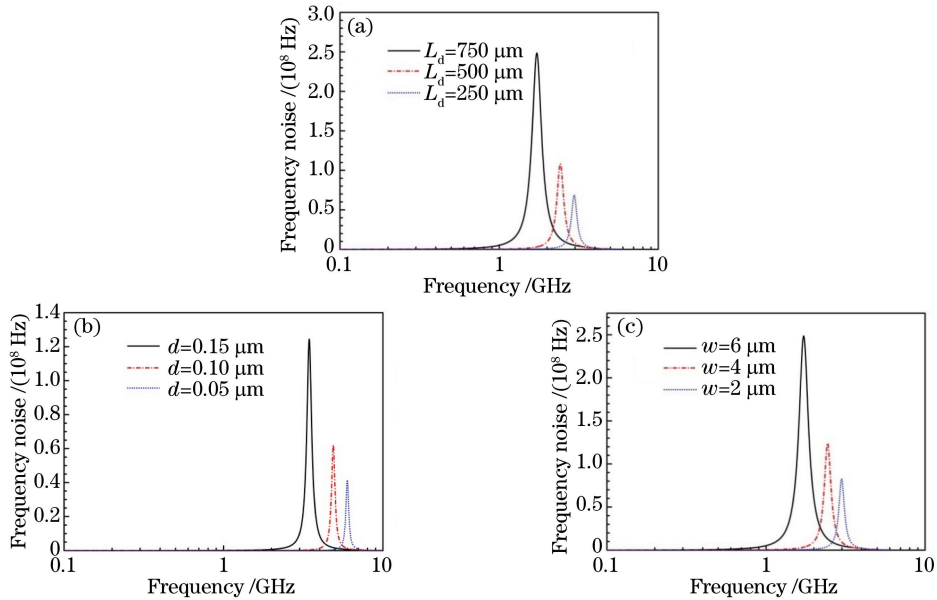


图 2 有源区的 (a) 长度、(b) 厚度和 (c) 宽度对激光器频率噪声功率谱密度的影响

Fig. 2 Effects of (a) length, (b) thickness and (c) width of active region on frequency noise power spectrum density of laser
抑制, 弛豫振荡频率得到提高。

FBG 外腔和光反馈的结构参数对抑制激光器频率噪声和减小线宽具有重要作用, 如外腔长度 L_{ext} 、光栅反射率 R_{ext} 和外腔耦合效率 C_0 等。基于光子在腔内的往返时间和有效反射率 R_{eff} 的关系, 分析得到 R_{eff} 与 L_{ext} 呈余弦形式的周期性变化关系。根据 R_{eff} 、腔内损耗和光子寿命的关系以及弛豫振荡频率 ω_r 的表达式, 得到 L_{ext} 与 ω_r 也呈余弦形式的周期性变化关系, 数值模拟结果如图 3 所示。

根据图 3 呈现的 L_{ext} 、 R_{eff} 和 ω_r 之间的周期性变化关系, 假设激光器频率噪声功率谱密度与 L_{ext} 也具有类似的关系, 通过合理设计 L_{ext} 可以实现对频率噪声和弛豫振荡频率的调控。在第 1, 4 个周期的下降沿分别取值, 并将此值作为外腔长度, 获得的频率噪声功率谱密度如图 4(a)、(b) 所示。可以看出, 在每个周期内的下降沿, 随着 L_{ext} 的减小, 频率噪声明显得到抑制, 而弛豫振荡频率(即调制频率上限)得到提高; 在每个周期的上升沿取值, 并将此值作为外腔长度, 得到与上述相反的结果。因此, 在图 3 所示的余弦函数极大值点中取值, 并将此值作为外腔长度, 可以获得最低的频率噪声和最高的弛豫振荡频率。若增加图 3 中余弦函数曲线的周期, 可以更加精准地控制外腔长度。根据(1)式, 发现影响 L_{ext} 、 R_{eff} 和 ω_r 之间周期性变化关系的主要因素为光子在外腔的往返时间 τ_c 。通过增大 n_{ext} (即光纤折射率), 可增加 τ_c , 进而改善变化周期。但是, 实际制作激光器时, 多采用锗掺杂石英光纤作为外腔介质, 其折射率的改变较为困难, 除非采用高掺杂或者特种光纤。此外, 根据外腔长度越长越有利于激光线宽变窄的 Schawlow-Townes 线宽理论^[4,11,20], 可以选择尽可能长的外腔, 但前提是保证激光的单纵模输出。

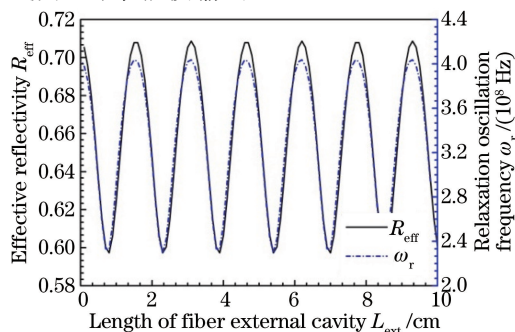


图 3 光纤外腔长度与有效反射率和弛豫振荡频率之间的关系

Fig. 3 Variations in effective reflectivity and relaxation oscillation frequency with length of fiber external cavity

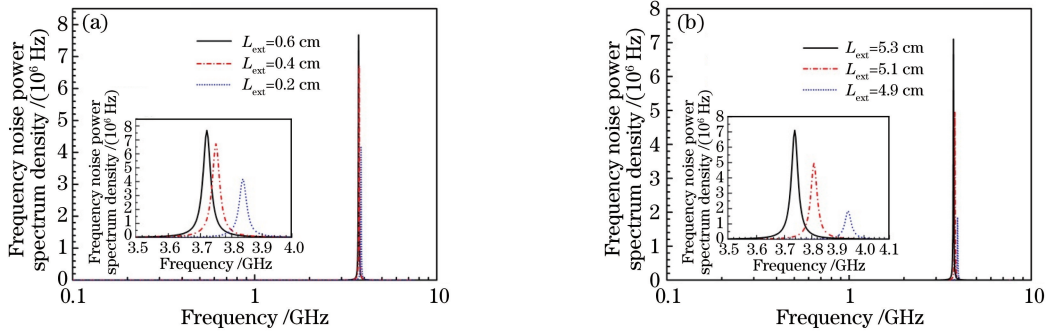


图 4 外腔长度取值于 (a) 第 1 个周期和 (b) 第 4 个周期下降沿时得到的频率噪声功率谱密度

Fig. 4 Frequency noise power spectrum density when the value of external cavity length is chosen from falling edge of (a) the first period and (b) the fourth period

在 FBG 外腔中,光栅反射率 R_{ext} 和增益芯片与光纤的耦合系数 C_0 也是影响激光器频率噪声的重要因素。数值仿真得到的 R_{ext} 和 C_0 对频率噪声功率谱密度的影响如图 5 所示。 R_{ext} 的取值分别为 0.1, 0.5, 0.9, C_0 的取值分别为 0.3, 0.6, 0.9。可以看出,随着外部光反馈的增加,激光器频率噪声减小,弛豫振荡频率增加了约 2.5 GHz,激光器调制特性得到提高。这是因为较大的 R_{ext} 和 C_0 可以有效降低腔内总损耗,延长光子寿命,减小阈值载流子浓度,从而降低频率噪声,提高弛豫振荡频率。但是, R_{ext} 过大会使激光器的输出功率过小,因此 R_{ext} 的选择需从实际出发,并进行综合考虑。

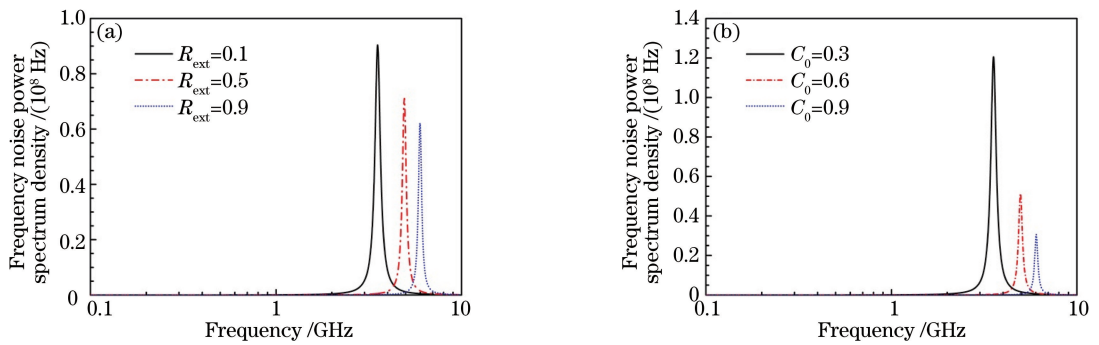


图 5 (a) 光栅反射率和 (b) 耦合系数对激光器频率噪声功率谱密度的影响

Fig. 5 Effects of (a) grating reflectivity and (b) coupling coefficient on frequency noise power spectrum density of laser

对于已封装的 FBG-ECSL,不同注入电流下 FBG-ECSL 的输出特性也不相同。因此,有必要分析注入电流对频率噪声的影响。图 6(a)为注入电流分别为 $2I_{\text{th}}$ 、 $4I_{\text{th}}$ 、 $6I_{\text{th}}$ 和 $8I_{\text{th}}$ 时激光器频率噪声功率谱密度的变化。可以看出,随着注入电流的增加,频率噪声显著降低。与注入电流为 $2I_{\text{th}}$ 的情况相比,注入电流为 $8I_{\text{th}}$ 时频率噪声降低约 14.7%,弛豫振荡频率增加了 6.0 GHz。为了研究注入电流对频率噪声峰值(弛豫振

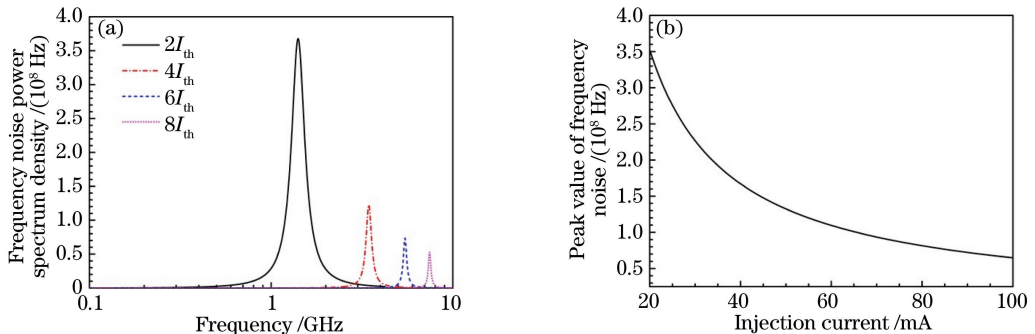


图 6 (a) 不同注入电流下的频率噪声功率谱密度; (b) 频率噪声峰值随注入电流的变化

Fig. 6 (a) Frequency noise power spectrum density under different injection currents; (b) relationship between peak value of frequency noise and injection current

荡频率处的峰值)的影响,模拟分析了连续电流变化对频率噪声的影响,如图 6(b)所示。当注入电流从 20 mA 连续增加至 100 mA 时,激光器的频率噪声下降约 18.5%。这是因为随着注入电流的增加,受激辐射产生的光子密度增加,降低了自发辐射的影响,从而使得增益谱波动减小,频率噪声得到抑制。

4 结 论

通过建立外腔半导体激光器的理论模型并结合激光器的动态速率方程,系统分析了 FBG-ECSL 的结构参数和外部光反馈对频率噪声特性和弛豫振荡频率的影响。仿真结果表明,降低增益芯片有源区尺寸和增大外部光反馈可以显著抑制激光器的频率噪声,并提高弛豫振荡频率。频率噪声功率谱密度随外腔长度的增加呈周期性变化。综合考虑线宽理论和单纵模输出,有利于改善激光噪声特性。此外,注入电流对改善频率噪声和调制频率上限具有重要作用。本文研究将对低噪声、窄线宽激光光源的设计和制备提供重要的理论指导,并在相干光通信、激光载波雷达和高精度光学传感等领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Kahn J M. Modulation and detection techniques for optical communication systems[J]. Coherent Optical Technologies and Applications, 2006: CThC1.
- [2] Zeng Fei, Gao Shijie, San Xiaogang, *et al.* Development status and trend of airborne laser communication terminals[J]. Chinese Optics, 2016, 9(1): 65-73.
曾 飞, 高世杰, 伞晓刚, 等. 机载激光通信系统发展现状与趋势[J]. 中国光学, 2016, 9(1): 65-73.
- [3] Powell D. Lasers boost space communications[J]. Nature, 2013, 499(7458): 266-267.
- [4] Coldren Larry A, Corzine Scott W. Diode lasers and photonic integrated circuits[M]. Shi Xinghan, Transl. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2006.
拉里·A·科尔德伦, 斯科特·W·科尔津. 二极管激光器与集成电路[M]. 史星寒, 译. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006.
- [5] Reddy U, Dias N L, Garg A, *et al.* A single spectral mode wide stripe laser with very narrow linewidth[J]. Appl Phys Lett, 2011, 99: 171109.
- [6] Jia P, Qin L, Chen Y Y, *et al.* Broad-stripe single longitudinal mode laser based on metal slots[J]. Opt Commun, 2016, 365: 215-219.
- [7] Wang Lijun, Ning Yongqiang, Qin Li, *et al.* Development of high power diode laser [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2015, 36(1): 1-19.
王立军, 宁永强, 秦 莉, 等. 大功率半导体激光器研究进展[J]. 发光学报, 2015, 36(1): 1-19.
- [8] Aoyama K, Yoshioka R, Yokota N, *et al.* Optical negative feedback for linewidth reduction of semiconductor lasers [J]. IEEE Photonic Technology Letters, 2015, 27(4): 340-343.
- [9] Pan Biwei, Yu Liqiang, Lu Dan, *et al.* 20 kHz narrow linewidth fiber Bragg grating external cavity semiconductor laser [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0502007.
潘碧玮, 余力强, 陆 丹, 等. 20 kHz 窄线宽光纤光栅外腔半导体激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0502007.
- [10] Jiang Luyun, Wang Linghua, Lin Zhongxi, *et al.* The effect of optical feedback on characteristic of the fiber Bragg grating external cavity semiconductor laser[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(7): 0701008.
江璐芸, 王凌华, 林中晔, 等. 光反馈对光纤光栅外腔半导体激光器特性的影响[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0701008.
- [11] Liu Dapeng, Chen Chao, Qin Li, *et al.* Study on linewidth characteristics of fiber grating external cavity semiconductor laser[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2016, 37(2): 165-169.
刘大鹏, 陈 超, 秦 莉, 等. 光纤光栅外腔半导体激光器的线宽特性研究[J]. 半导体光电, 2016, 37(2): 165-169.
- [12] Li Hui, Du Jiayao, Qu Yi, *et al.* Low power dissipation 980 nm single mode pumping source laser with wavelength stabilization[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2016, 37(1): 33-37.
李 辉, 都继瑶, 曲 轶, 等. 光谱稳定的低功耗 980 nm 单模泵浦源半导体激光器[J]. 发光学报, 2016, 37(1): 33-37.
- [13] Xu Qingyang, Chen Shaowu. Improved model analysis of fiber grating external cavity semiconductor lasers[J]. Chinese

J Lasers, 2005, 32(2): 156-160.

徐庆扬, 陈少武. 光纤光栅外腔半导体激光器改进模型分析[J]. 中国激光, 2005, 32(2): 156-160.

- [14] Tang R, Kita T, Yamada H. Narrow-spectral-linewidth silicon photonic wavelength-tunable laser with highly asymmetric Mach-Zehnder interferometer[J]. Opt Lett, 2015, 40(7): 1504-1507.
- [15] Alalusi M, Brasil P, Lee S, *et al.* Low noise planar external cavity laser for interferometric fiber optic sensors[C]. SPIE, 2009, 7316: 73160X.
- [16] Liang W, Ilchenko V S, Eliyahu D, *et al.* Ultralow noise miniature external cavity semiconductor laser[J]. Nat Commun, 2015: 7371.
- [17] Premaratne M, Lowery A J, Ahmed Z, *et al.* Modeling noise and modulation performance of fiber grating external cavity lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topic in Quantum Electronics, 1997, 3(2): 290-303.
- [18] Loh W, O'Donnell F J, Plant J J, *et al.* Packaged, high-power, narrow-linewidth slab-coupled optical waveguide external cavity laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(14): 974-976.
- [19] Bartolo B, Kirkendall C K, Kupersmidt V, *et al.* Achieving narrow linewidth, low phase noise external cavity semiconductor lasers through the reduction of $1/f$ noise[C]. SPIE, 2006, 6133: 613301.
- [20] Zhan Biao, Xu Shanhui, Mo Shupe, *et al.* Study on relaxation oscillation suppression in a short cavity single frequency DBR fiber laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(9): 090602.
湛 彪, 徐善辉, 莫树培, 等. 短腔单频 DBR 光纤激光器中弛豫振荡噪声抑制的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(9): 090602.
- [21] Hisham H K, Abas A F, Mahdiraji G A, *et al.* Optimizing the external optical cavity parameters for performance improvement of a fiber grating Fabry-Perot laser[J]. Opt Rev, 2015, 22(2): 278-288.
- [22] Cheng W H, Chiu S F, Hong C Y, *et al.* Spectral characteristics for a fiber grating external cavity laser[J]. Opt Quant Electron, 2000, 32(3): 339-348.
- [23] Erdogan T. Fiber grating spectra[J]. J Lightwave Technol, 1997, 15(8): 1277-1294.
- [24] Agrawal G P, Dutta N K. Semiconductor lasers[M]. 2nd ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993, 126-142.
- [25] Henry C H. Theory of the linewidth of semiconductor lasers[J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1982, QE-18(2): 259-264.
- [26] Ahmed M, Yamada M, Saito M. Numerical modeling of intensity and phase noise in semiconductor lasers[J]. IEEE J Quantum Electron, 2001, 37(12): 1600-1610.