

电泵浦垂直外腔面发射激光器振荡特性的理论分析及实验研究

张星¹, 宁永强^{1*}, 张建伟^{1,2}, 张建^{1,2}, 秦莉¹, 刘云¹, 佟存柱¹, 王立军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, 长春市 130033;

2. 中国科学院大学, 北京市 100049)

摘要:对具有 InGaAs/GaAsP 量子阱周期增益结构有源区的 980 nm 电泵浦垂直外腔面发射激光器 (EP-VECSEL) 的振荡特性进行了理论分析及实验研究. 模拟并分析了耦合腔条件下 EP-VECSEL 的振荡特性与其分布布拉格反射镜 (DBR) 及外腔镜反射率之间的关系, 并根据理论分析结果对器件结构进行了优化设计. 在实验上制备出具有不同外腔镜反射率的 EP-VECSEL 器件, 并对其连续波 (CW) 振荡特性进行了研究. 实验结果表明, 有源区直径为 300 μm 的 EP-VECSEL 器件在外腔镜反射率为 90% 时阈值电流为 1.2 A, 注入电流为 4 A 时连续激光输出功率为 270 mW; 在外腔镜反射率为 95% 时阈值电流为 0.9 A, 4 A 下输出激光功率为 150 mW. 实验结果与理论分析结论符合较好, 说明本文采用的理论分析方法能有效模拟及优化 EP-VECSEL 器件的振荡特性.

关键词:垂直外腔面发射激光器; 电泵浦; 振荡特性; 耦合腔; 阈值电流; 微分子量子效率
中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

Oscillation characteristics of electrically-pumped vertical external cavity surface emitting lasers

ZHANG Xing¹, NING Yong-Qiang^{1*}, ZHANG Jian-Wei^{1,2},
ZHANG Jian^{1,2}, QIN Li¹, LIU Yun¹, TONG Cun-Zhu¹, WANG Li-Jun¹

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

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

Abstract: The oscillation characteristics of 980 nm electrically-pumped vertical-external-cavity surface-emitting laser (EP-VECSEL) with periodic gain structure active region of InGaAs/GaAsP quantum well was analyzed theoretically and experimentally. The relationship between the DBR & external cavity mirror reflectivity and the oscillating characteristic characteristics of the EP-VECSEL with coupled cavity was simulated. Furthermore, based on the results of simulation, the device structure was optimized. EP-VECSEL devices with different external cavity reflectivity were fabricated and the continuous-wave (CW) oscillation output characteristics were studied. The results of experiment indicated that the threshold current of the 300 μm -device with 90% external mirror reflectivity was 1.2 A and its output power was 270 mW while under injected current of 4A; the output power of the 300 μm -device with 95% external mirror reflectivity was 150 mW at 4 A of injected current and the threshold current was 0.9 A. The experimental results were in good agreement with theoretical analysis, indicating that the model using in this article is suitable for the optimization of EP-VECSEL's oscillation characteristics.

Key words: vertical-external-cavity surface-emitting lasers; electrically-pumped; oscillation characteristics; coupled cavity; threshold current; different quantum efficiency

PACS: 42.55. Px

收稿日期: 2012-12-23, 修回日期: 2013-04-01

Received date: 2012-12-23, revised date: 2013-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(61204056, 61234004, 11074247, 51172225); 吉林省科技发展项目(201105025, 20116011)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(61204056, 61234004, 11074247, 51172225), Jilin Province Science and Technology Development Project(201105025, 20116011)

作者简介 (Biography): 张星(1983-), 男, 吉林辉南人, 助理研究员, 博士, 主要研究领域为新型半导体光电子器件, E-mail: zhangx@ciomp.ac.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn

引言

垂直外腔面发射激光器 (Vertical-External-Cavity Surface-Emitting Lasers, VECSEL) 是一种新型半导体激光器, 由于其具有可与固体激光器相媲美的输出功率及光束质量, 同时兼具半导体激光器低成本及结构紧凑等优点, 在激光显示、激光泵浦及生物医学研究等领域均有很好的应用前景^[1-5]. 近年来国内外许多科研机构均报道了光泵浦 (Optically-pumped, OP) VECSEL 方面的研究结果, 通过外加反射镜构成的“空气腔”结构器件能够实现稳定的单模工作, 可实现光束质量因子 M^2 接近 1 的激光输出^[6]; 通过优化外延结构及泵浦方式, 光-光转换效率可接近 50%^[7-8]; 进一步改进散热之后, 已实现超过 100 W 的单模输出功率^[9]. 虽然目前已取得很大进展, 但是 OP-VECSEL 始终需要外加泵浦光源, 这在很大程度上限制了其整体结构的紧凑化及电-光转换效率的进一步提高. 因此, 引入电泵浦 (Electrically-pumped, EP) 方式成为 VECSEL 研究的发展趋势, 一方面由于 EP-VECSEL 能够通过电注入结构直接将电能转化为激光输出, 具有更高的电-光转换效率; 另一方面由于无需外加泵浦光源, EP-VECSEL 具有更简单的封装结构及更低的制造成本, 因此更有希望实现光源模块的紧凑化、小型化.

目前国外多个科研机构已经报道了 EP-VECSEL 方面的研究结果, 包括基模输出^[10]、腔内倍频^[11]、近红外及中红外输出^[12-13]、锁模^[14]以及窄激光频率线宽工作^[15]等, 上述报道多数侧重于直接研究器件的功率特性、模式特性或动态特性, 而并没有详细讨论 EP-VECSEL 器件结构优化设计. 虽然作为一种电泵浦器件, EP-VECSEL 的半导体部分, 包括电注入结构、有源区、分布布拉格反射镜 (Distributed Bragg Reflector, DBR) 等均可借鉴普通垂直腔面发射激光器 (Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, VCSEL) 的成熟设计经验来加以优化^[16-17], 但是由于外腔结构的引入, EP-VECSEL 器件的振荡特性将与 VCSEL 截然不同, 其阈值电流及微分量子效率等振荡特性参数将由 DBR 及外腔镜共同构成的耦合谐振腔决定. 因此, 需要结合具体的器件结构对耦合腔条件下 EP-VECSEL 的振荡特性进行优化, 本文将从理论及实验两方面对这一问题进行研究.

以输出波长为 980 nm, 具有 InGaAs/GaAsP 周期增益量子阱结构的 EP-VECSEL 器件为例: 在理论方面, 基于等效谐振腔理论分析了耦合腔条件下器

件的阈值电流、微分量子效率等振荡特性参数与谐振腔各镜面反射率之间的依赖关系, 模拟了不同有源区直径及镜面反射率对器件输出特性的影响并提取出最优化结构参数; 在实验上制备出一系列具有不同外腔镜反射率的 EP-VECSEL 器件, 对器件连续波振荡特性进行了研究, 并将其与理论分析结果进行了对比.

1 理论分析

1.1 器件结构

图 1(a) 所示为 EP-VECSEL 的器件结构及有源区结构示意图, 需要注意的是图中所示的外腔结构为最简单的线性结构, 也可以采用其他类型的谐振腔如“Z”型腔等来满足不同的应用需求. EP-VECSEL 器件的半导体部分依次包括 N 面电极、出光窗口、GaAs 衬底、N-DBR、980 nm InGaAs/GaAsP 有源区、P-DBR 及 P 面电极. 图 1(b) 所示的 EP-VECSEL 有源区由三个 GaInAs/GaAsP 量子阱组成, 同时引入 AlGaAs 间隔层来使激光器的腔长保持为 $\lambda/2n$ 的整数倍^[18], 可使谐振腔内光场驻波的波腹恰好处于量子阱的阱层处, 这样就构成了周期增益结构 (Periodic Gain Structure, PGS), 是激射波长, n 是有源区在该波长处的有效折射率, 采用 PGS 结构的好处在于其能够有效提高激光器的纵模限制因子^[19], 进而使激光器的阈值电流最小化.

1.2 耦合谐振腔下 EP-VECSEL 的振荡特性参数表达式

图 2 为 EP-VECSEL 的谐振腔结构示意图, 该谐振腔包括三个镜面: P-DBR、N-DBR 以及外腔镜, 是一种由两个子谐振腔构成的耦合谐振腔. 激光器芯片上生长的 P-DBR、N-DBR 以及夹在其中的有源区组成的谐振腔为有源腔, 提供激射所需的增益; 由 P-DBR 及外腔镜组成的谐振腔为无源腔, 作用是通过控制不同传输模式的损耗, 使高阶横模被抑制, 从而起到改善光束质量的作用. EP-VECSEL 发生激光振荡所需的反馈由 P-DBR、N-DBR 及外腔反射镜共同提供, 因此确定合适的谐振腔镜面反射率将直接决定激光器的振荡特性, 下面将详细分析耦合谐振腔条件下镜面反射率与 EP-VECSEL 振荡特性之间的关系.

P-DBR、N-DBR 的振幅反射系数可分别表示为 r_1 、 r_2 , 外腔镜振幅反射系数为 r_3 , 需要注意的是 r_3 中包含了外腔损耗. 根据传输矩阵理论, 这种包含三个镜面的耦合谐振腔可以等效为两镜面有源谐振

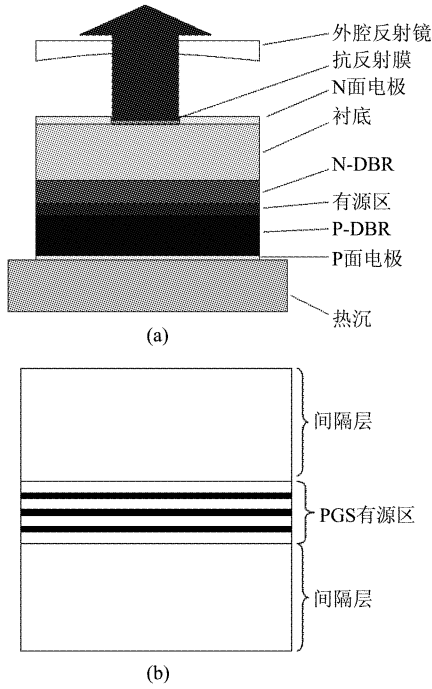


图1 980 nm EP-VECSEL 示意图(a)器件结构,(b)有源区结构
Fig.1 Schematic of 980 nm EP-VECSEL (a) device structure, and (b) active region

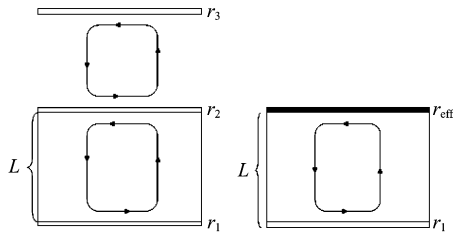


图2 EP-VECSEL 的耦合谐振腔及其等效腔体,激光振荡所需的反馈由谐振腔的三个镜面共同提供
Fig.2 The coupled cavity of EP-VECSEL and its equivalent cavity. The feedback of laser oscillation is provided by the three mirrors of the coupled cavity

腔,如图2所示.等效谐振腔的两个镜面的振幅反射系数分别为 r_1 及 r_{eff} ,其中 r_{eff} 为等效反射系数,其表达式推导为^[20]:

$$r_{eff} = r_2 + \frac{T_2 r_3 \exp(i\phi_l)}{1 + r_2 r_3 \exp(i\phi_l)}, \quad (1)$$

其中 T_2 代表镜面2处的透过率,这里代表DBR的能带间吸收; ϕ_l 代表光波在副腔中往返一周产生的相位变化,主要与外腔镜的放置位置有关,当外腔提供的反馈强度很强时可以忽略^[21],考虑到镜面反射率 $R_1 = r_1^2$ 以及 $R_2 = r_2^2$,可以得到等效反射率的表达式为

$$R_{eff} = \left(\frac{\sqrt{R_2} + \sqrt{R_3}}{1 + \sqrt{R_2 R_3}} \right)^2, \quad (2)$$

其中 $R_3 = \rho^2 R$, ρ 为外腔耦合效率,其中包含所有的外腔损耗, R 为外腔镜反射率.引入等效反射率 R_{eff} 并忽略衍射损耗,EP-VECSEL的阈值模式增益表达式可表示为^[19]:

$$\Gamma_z g_{th} = \alpha_{in} + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_{eff}}} \right), \quad (3)$$

其中 Γ_z 代表纵模限制因子, g_{th} 代表阈值增益, α_{in} 代表增益腔的内部损耗, L 代表谐振腔长度.根据量子阱激光器的增益与载流子密度之间的关系^[20],由式(3)可以得到阈值电流密度 J_{th} 的表达式:

$$J_{th} = q n_w d_w B N_v^2 \exp \left(\frac{2}{g_N \Gamma_z} \left[\alpha_{in} + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_{eff}}} \right) \right] \right), \quad (4)$$

式中 B 为双分子复合系数, N_v 为透明电流密度, q 为电子电量, n_w 为量子阱个数, d_w 为量子阱厚度, g_N 为增益系数.将式(4)乘以有源区的面积 A_s ,同时考虑内量子效率 η_i 的影响,可以得到阈值电流 I_{th} 的表达式为:

$$I_{th} = \frac{q V B N_v^2}{\eta_i} \exp \left(\frac{2}{g_N \Gamma_z} \left[\alpha_{in} + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_{eff}}} \right) \right] \right), \quad (5)$$

其中 V 代表量子阱的体积.从式(5)中可以看出,器件量子阱结构确定之后(随工作波长而定),有关的结构参数均为常量,此时发生激光振荡时的阈值电流就主要由有源区面积以及等效反射率来决定.

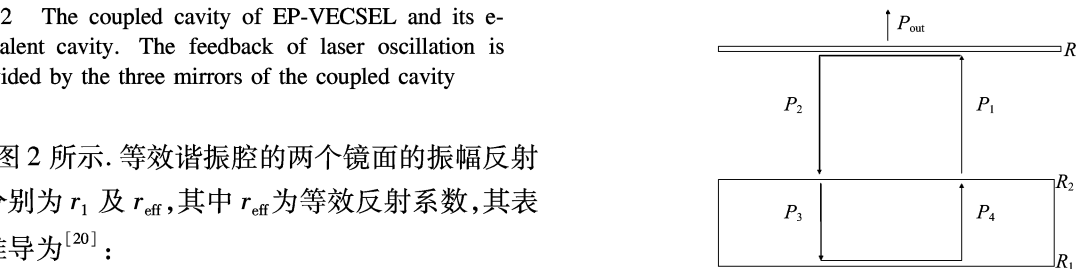


图3 EP-VECSEL 内部光功率循环传输示意图
Fig.3 Schematic of internal power circulation of EP-VECSEL

EP-VECSEL 有源及无源谐振腔内部光功率的循环传输如图3所示,其中 P_1 代表通过 N-DBR 的输出的光功率, P_2 代表由于外腔镜反射而返回谐振腔内部的光功率, P_{out} 代表通过外腔镜耦合输出的光

功率. 从图中可见器件最终输出的光功率直接由 N-DBR 及外腔镜反射率决定, 此时仍可采用等效谐振腔理论表示 P_{out} , 其表达式为^[11]:

$$P_{out} = \frac{\eta_i \eta_{eff} h\nu}{q} (I - I_{th}) \quad (6)$$

其中 $h\nu$ 代表光子能量; I 为注入电流; I_{th} 由式(5)决定; η_{eff} 代表微分量子效率, 代表输出光子数占增益腔内部光子数的比例, 在耦合腔条件下其表达式为:

$$\eta_{eff} = \frac{\frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_{eff}}}\right)}{\alpha_{in} + \frac{1}{L} \left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_{eff}}}\right)} \quad (7)$$

如果同时考虑由于器件内部废热导致的自热效应, P_{out} 可改写为:

$$P_{out} = \frac{\eta_i \eta_{eff} h\nu}{q} (I - I_{th}) \left(1 - \frac{\Delta T}{T_{off}}\right) \quad (8)$$

其中 T_{off} 为器件截止温度; ΔT 为器件内部温升, $\Delta T = R_t [(V_k + IR_d)I - P_1]$, V_k 代表开启电压; R_d 代表微分电阻; $R_t = (2\sigma D)^{-1}$ 为热阻, σ 为热沉材料的热导率, D 为有源区直径.

可以得到耦合腔条件下, P_{out} 表达式为:

$$P_{out} = \frac{\eta_i h\nu (I - I_{th}) \left(1 - \frac{\Delta T}{T_{off}}\right)}{q} \frac{\frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_{eff}}}\right)}{\alpha_{in} + \frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_{eff}}}\right)} \quad (9)$$

1.3 模拟结果及讨论

本节将基于 1.2 节中得到的耦合腔条件下 EP-VECSEL 振荡特性参数表达式来模拟器件的振荡特性, 进而对其器件结构进行优化. 模拟中使用的激光器及材料特性参数列于表 1.

表 1 器件结构及材料参数

Table 1 Parameters of device structure & material

参量	名称	数值	单位
n	有源区折射率	3.5	-
λ	激光波长	980	nm
α_{in}	腔内吸收系数	10	cm^{-1}
d_w	量子阱厚度	0.006	μm
n_w	量子阱个数	3	-
g_N	材料增益系数	2 100	cm^{-1}
η_i	内量子效率	1	-
N_{tr}	透明载流子密度	1.7×10^{18}	cm^{-3}
ρ	外腔耦合效率	0.85	-
B	双分子复合系数	1.0×10^{-10}	cm^3/sec
T_{off}	器件截止温度	130	K
V_k	开启电压	1.5	V
σ	热沉材料热导率	400	$W \cdot m^{-1} K^{-1}$

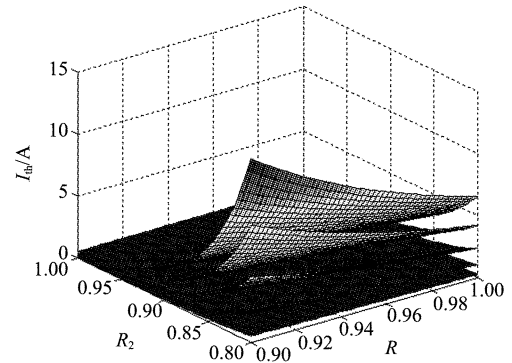


图 4 有源区直径 D (μm) 分别为 100, 200, 300, 400 及 500 时(从下到上), 阈值电流 I_{th} 与 N-DBR 反射率 R_2 及外腔镜反射率 R 之间的关系

Fig. 4 The relationship between threshold current I_{th} , N-DBR reflectivity R_2 , and external cavity mirror reflectivity R , the active region diameter D (μm) = 100, 200, 300, 400, and 500 (bottom to top)

降低 N-DBR 反射率能够加强耦合谐振腔中子谐振腔之间的耦合, 进而促进器件模式特性的改善^[17], 但由于 EP-VECSEL 的增益腔长度很短(波长量级), 需要较高的 N-DBR 反射率(较低的镜面损耗)才能将器件的阈值电流维持在合理范围, 因此首先需要确定合适的 N-DBR 反射率. 图 4 为计算得到具有不同有源区直径 EP-VECSEL 器件发生激光振荡时的阈值电流与 N-DBR 反射率及外腔镜反射率之间的关系曲面. 从图中可以看出, 有源区直径较大的器件 ($\geq 400 \mu m$) 由于需要更高的阈值增益, 因此其阈值电流对于 N-DBR 反射率及外腔镜反射率的变化更为灵敏, 当 N-DBR 反射率降低至 85% 时, 400 μm 及 500 μm 器件的阈值电流均已超过 2 A, 而过高的阈值电流意味着更高的工作电流及更低的转换效率, 随之而来的电流拥挤效应和自热效应不利于器件模式特性的改善^[22]. 同时, 为保持较低阈值电流, EP-VECSEL 的有源区直径不宜超过 400 μm , 从图 4 中可见当 N-DBR 反射率为 86% ~ 88% 之间时 100 μm , 200 μm 及 300 μm 器件的阈值电流在外腔镜反射率为 90% ~ 99% 时均低于 1.5 A.

为了通过耦合输出更高的功率, 需要提高 EP-VECSEL 的微分量子效率, 这需要降低外腔镜的反射率, 但这也提高到了器件的阈值电流. 图 5 所示为计算得到在几种外腔镜反射率条件下有源区直径 300 μm EP-VECSEL 器件的连续波 (CW) 激光振荡输出特性与 N-DBR 反射率之间的关系. 从图中可见较高的外腔镜反射率意味着 N-DBR 反射率的可调

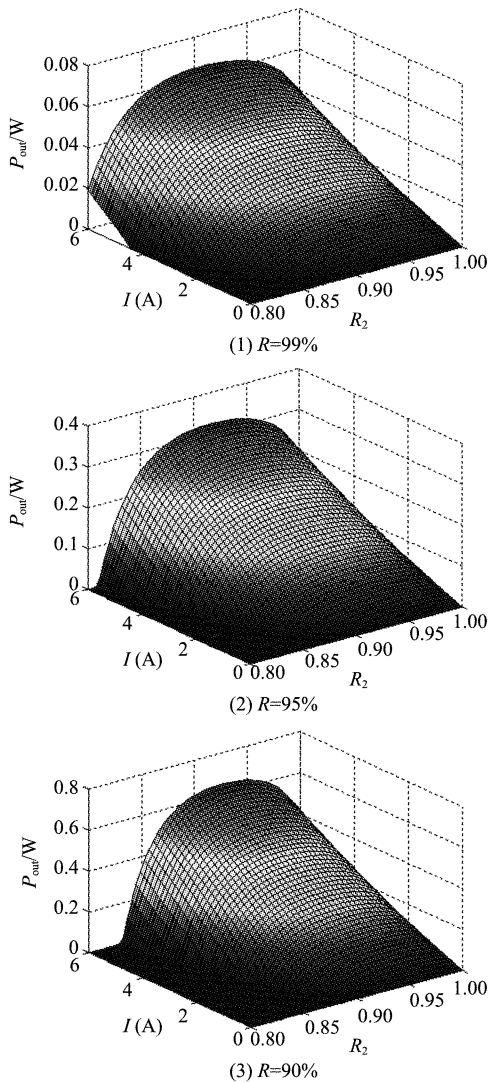


图5 外腔镜反射率 R 分别为 99%、95%、90%，有源区直径 $D = 300 \mu\text{m}$ ，未考虑热效应影响时，通过外腔镜耦合输出功率 P_{out} (W) 与 N-DBR 反射率 R_2 及注入电流 I (A) 的变化关系

Fig. 5 The calculated relationship without consideration of thermal effects between external cavity coupled output power P_{out} (W), N-DBR reflectivity R_2 , and injected current I (A). The reflectivity of external cavity mirror R is 99%, 95%, 90%, the diameter of active region is $300 \mu\text{m}$

节范围较大，之前对外腔镜反射率为 99% 时器件阈值电流的模拟结果也说明了这一点，但此时器件的输出功率过低；降低外腔镜反射率虽然意味着更高的输出功率，但 N-DBR 反射率需要维持较高值 ($\geq 90\%$) 以保持较低阈值电流，而较高的 N-DBR 反射率会导致器件的子谐振腔之间很难发生相互耦合^[17]。因此，综合考虑子谐振腔之间的耦合及较高的输出功率，外腔镜反射率应为 90% ~ 95% 之间。

图6 所示为固定 N-DBR 反射率为 88%，外腔镜

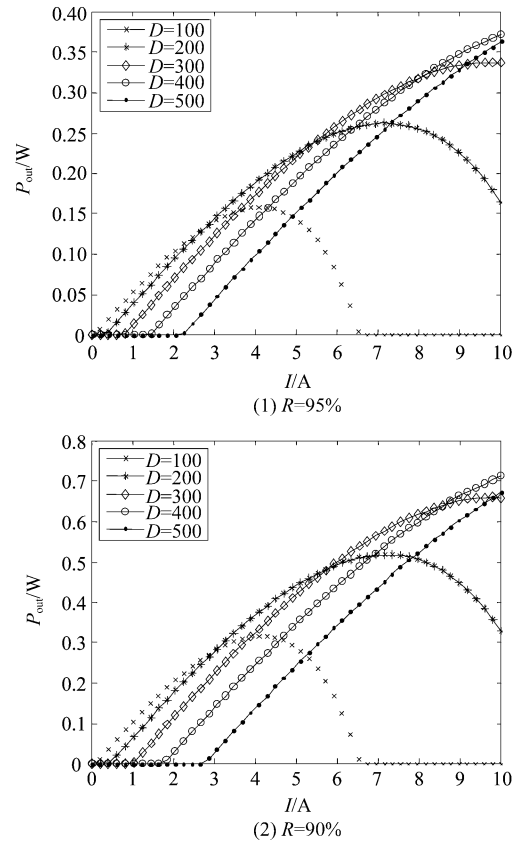


图6 外腔镜反射率分别为(1)95%及(2)90%时，不同有源区直径 EP-VECSEL 器件通过外腔镜耦合输出功率 P_{out} 与注入电流 I 的关系

Fig. 6 The calculated injected current dependence of the external cavity mirror coupled power of the EP-VECSEL devices with different active region diameters when the reflectivity of external cavity mirror is (1) 95% and (2) 90%

反射率分别为 95% 及 90% 时，具有不同有源区直径 EP-VECSEL 器件的 CW 振荡输出特性模拟曲线。从图中可见对于 $300 \mu\text{m}$ 器件而言，当外腔镜反射率为 90% ~ 95% 时，器件均具有较低的阈值电流及较高的微分量子效率，当外腔镜反射率为 90% 时， $300 \mu\text{m}$ 器件的阈值电流约为 1 A，在 4 A 注入电流下的输出功率约为 300 mW；当外腔镜反射率为 95% 时，阈值电流约为 0.9 A，4 A 时的输出功率约为 180 mW。

2 实验研究

2.1 具有一体化谐振腔的 EP-VECSEL 器件

为了对第 1 部分中 EP-VECSEL 振荡特性理论分析的结果进行验证，制备了一种具有一体化谐振腔结构的 EP-VECSEL 器件。器件制备采用的外延片是由金属氧化物化学气相沉积法 (MOCVD) 生长而

成,其结构如图 1 所示,需要注意的是在外延结构中分别包含 30 对 P-DBR 及 10 对 N-DBR,反射谱测试结果表明 P-DBR 及 N-DBR 的反射谱中心波长均为 980 nm,反射率分别为 99.9% 及 88%. 器件的具体制作工艺流程如下:首先采用电感耦合等离子体(ICP)干法刻蚀在外延片 P 型掺杂面(P 面)刻蚀出一系列圆形台面,刻蚀深度超过氧化限制层,进行侧氧化后,在 P 面溅射生长 SiO_2 薄膜作为钝化层,随后利用反应离子束刻蚀(RIE)将圆形台面上的 SiO_2 刻蚀掉并生长 Ti/Pt/Au 层形成电极接触. 为了降低吸收损耗,将外延片的 N 面减薄抛光至 200 μm 以下,并通过双面对准在 N 面制作出光窗口,溅射生长 AuGeNi/Au 后在 420 $^\circ\text{C}$ 下合金 1 min 来形成欧姆接触. 我们随后在芯片 N 面出光窗口处镀制了反射率分别为 90% 及 95% 的 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 多层介质膜来形成外腔镜,这样就制成了具有一体化外腔结构的 EP-VECSEL 器件,其结构如图 7 所示,此时发生激光振荡所需的光反馈由 P-DBR、N-DBR 及出光窗口处的外腔镜共同提供.

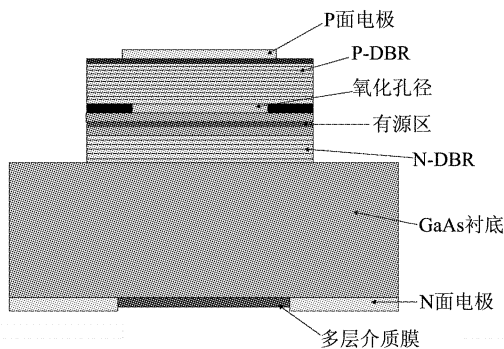


图 7 具有一体化外腔结构的 980 nm EP-VECSEL 器件
Fig. 7 980 nm EP-VECSEL device with monolithic external cavity

2.2 器件测试结果及讨论

首先测试了有源区直径为 300 μm ,窗口未镀反射膜器件的 CW 振荡输出特性. 此时器件出光窗口为单纯的 GaAs 衬底,其对 980 nm 激光的反射率仅为 30%,此时 EP-VECSEL 耦合谐振腔提供的反馈将难以使其产生激光振荡. 从图 8 中可见器件在注入电流为 4 A 时输出功率仅为 20 mW,从其输出光谱可见在 0 ~ 4 A 始终工作在放大自发发射状态,未发生激光.

图 9 所示为有源区直径 300 μm ,外腔镜反射率分别为 90% 及 95% 的 EP-VECSEL 器件的 CW 振荡输出特性测试结果. 从图中可见外腔镜反射率 90%

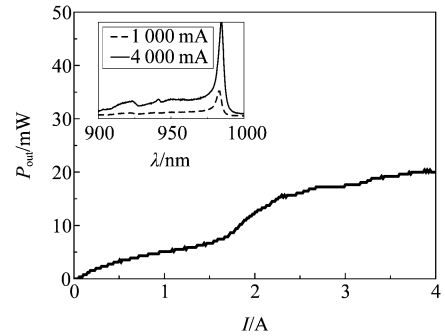


图 8 外腔反射率为 30% 时直径 300 μm 的 EP-VECSEL CW 振荡输出特性曲线及光谱
Fig. 8 The CW oscillation output characteristics and spectra of EP-VECSEL with 300 μm -diameter-active region and 30% of external cavity mirror reflectivity

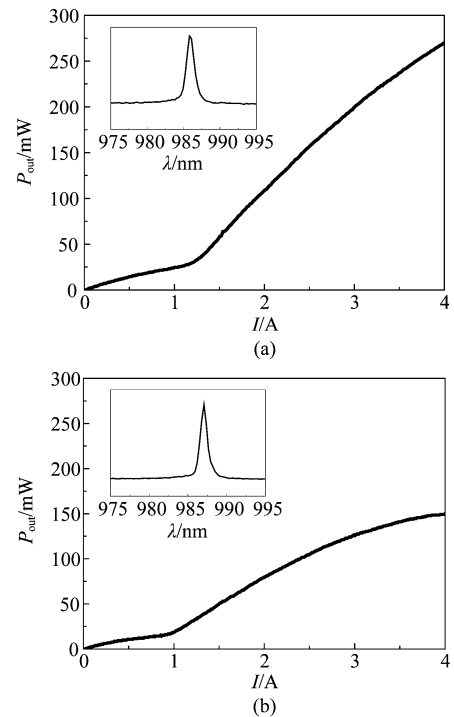


图 9 有源区直径为 300 μm ,外腔镜反射率分别为 (a) 90% 及 (b) 95% 的 EP-VECSEL 器件 CW 振荡输出特性曲线及光谱
Fig. 9 The CW oscillation output characteristics and spectra of 300 μm EP-VECSEL devices. The reflectivity of external cavity mirror is (a) 90% and (b) 95%, respectively

器件的阈值电流为 1.2 A,在 4 A 注入电流下的输出功率为 270 mW; 而 95% 器件的阈值电流为 0.9 A,当注入电流为 4 A 时输出功率为 150 mW. 从光谱测试结果可见此时 EP-VECSEL 器件能够通过耦合谐振腔产生激光振荡,外腔镜反射率为 90% 时,器件

阈值电流较高,但具有更高的微分量子效率,可通过外腔镜耦合输出更高的功率.由此可见实验研究得出的变化规律与理论分析结果具有较好的一致性,说明本文中用于分析 EP-VECSEL 振荡特性的理论模型能够准确模拟其耦合谐振腔.

3 结论

基于等效谐振腔理论分析了 980nm EP-VECSEL 耦合腔条件下的阈值电流、微分量子效率等振荡特性参数与谐振腔镜面反射率之间的关系.理论分析表明,为了保证 EP-VECSEL 的子谐振腔之间有充足的耦合,需要尽量降低 N-DBR 反射率,但 N-DBR 反射率过低会导致器件发生激光振荡的阈值电流过高,同时阈值电流也会受到有源区直径的影响,综合考虑以上因素将 N-DBR 反射率确定为 86% ~ 88%;为了提高器件的微分量子效率,使其通过外腔镜耦合输出更高功率的同时保持较低阈值电流,外腔镜反射率确定为 90% ~ 95% 之间.为了对理论分析得出的结论进行验证,在实验上制备了一系列具有不同外腔镜反射率的 EP-VECSEL 器件. CW 振荡输出特性测试结果表明,外腔镜反射率为 30% 的器件由于谐振腔无法提供足够的反馈而无法激射;外腔镜反射率为 90%,有源区直径为 300 μm 的器件阈值电流为 1.2 A,在注入电流为 4 A 时的 CW 输出激光功率为 270 mW;当外腔镜反射率为 95% 时,器件的阈值电流为 0.9 A,注入电流为 4A 时的 CW 输出激光功率为 150 mW.实验结果与理论分析结论具有很好的一致性,说明本文采用的理论方法能够有效模拟及优化 EP-VECSEL 器件的振荡特性.

REFERENCES

- [1] Kuzetsov M, Hakimi F, Sprague R, *et al.* Design and characteristics of high-power (> 0.5 -W CW) diode-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor lasers with circular TEM₀₀ beams [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1999, **5**(3): 561-573.
- [2] Tropper A C, Hoogland S. Extended cavity surface-emitting semiconductor lasers [J]. *Prog. Quantum Electron.*, 2006, **30**(1): 1-43.
- [3] Kuzetsov M. *VECSEL Semiconductor Lasers: A Path to High-Power, Quality Beam and UV to IR Wavelength by Design*, in *Semiconductor Disk Lasers* [M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012: 1-71.
- [4] Leinonen T, Korpjarvi V M, Harkonen A, *et al.* Recent advances in the development of yellow-orange GaInNAs-based semiconductor disk lasers [J]. *Proc. SPIE*, 2012, **8242**(824208): 1-7.
- [5] Rautiainen J, Butkus M, Krestnikov I, *et al.* High-power quantum dot semiconductor disk lasers [J]. *Proc. SPIE*, 2012, **8242**(824207): 1-10.
- [6] Rudin B, Rutz A, Hoffmann M, *et al.* Highly efficient optically pumped vertical-emitting semiconductor laser with more than 20 W average output power in a fundamental transverse mode [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(22): 2719-2721.
- [7] Beyertt S S, Brauch U, Demaria F, *et al.* Efficient Gallium-Arsenide Disk Laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2007, **43**(10): 869-875.
- [8] Demaria F, Lorch S, Menzel S, *et al.* Design of highly efficient high-power optically pumped semiconductor disk lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(3): 973-977.
- [9] Dyball H. The power of VECSELs [J]. *Electron. Lett.*, 2012, **48**(9): 467-467.
- [10] Mcinerney J G, Mooradian A, Lewis A, *et al.* High-power surface emitting semiconductor laser with extended vertical compound cavity [J]. *Electron. Lett.*, 2003, **39**(6): 523-525.
- [11] Rafailov E U, Sibbett W, Mooradian A, *et al.* Efficient frequency doubling of a vertical-extended-cavity surface-emitting laser diode by use of a periodically poled KTP crystal [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(21): 2091-2093.
- [12] Kurdi M E, Bouchoule S, Bousseksou A, *et al.* Room-temperature continuous-wave laser operation of electrically-pumped 1.55 μm VECSEL [J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(11).
- [13] Harkonen A, Bachmann A, Shamsul A, *et al.* 2.34- μm electrically pumped VECSEL with buried tunnel junction [J]. *Proc. SPIE*, 2010, **7720**(772015): 1-7.
- [14] Barbarin Y, Hoffmann M, Pallmann W P, *et al.* Electrically pumped vertical external cavity surface emitting lasers suitable for passive modelocking [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2011, **17**(6): 1779-1786.
- [15] Guo B M, Wang Q, Xu B, *et al.* High-power low-noise VCSEL seed laser for fiber laser applications [J]. *Proc. SPIE*, 2010, **7615**(76150H): 1-8.
- [16] Orchard J R, Childs D T, Lin L C, *et al.* Tradeoffs in the realization of electrically pumped vertical external cavity surface emitting lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2011, **17**(6): 1745-1752.
- [17] Kreuter P, Witzigmann B, Mass D J H C, *et al.* On the design of electrically pumped vertical-external-cavity surface-emitting lasers [J]. *App. Phys. B*, 2008, **91**(2): 257-264.
- [18] LI Hui-Qing, ZHANG Jie, CUI Da-Fu, *et al.* Optimal designs for high-power vertical cavity emitting laser [J]. *ACTA Phy. Sin.*, (李惠青,张杰,崔大复,等. 高功率垂直腔面发射半导体激光器优化设计研究. *物理学报*), 2004, **53**(9): 2986-2990.
- [19] Yu S F. *Analysis and design of vertical cavity surface emitting lasers* [M]. New York: Wiley, 2003.
- [20] Coldren L A, Corzine S W. *Diode lasers and photonic integrated circuits* [M]. New York: Wiley, 1995.
- [21] Tkach R., Chraplyvy A. Regimes of feedback effects in 1.5 μm distributed feedback lasers [J]. *IEEE J. Light. Tech.*, 1986, **4**(11): 1655-1661.
- [22] Zhang X, Ning Y Q, Zeng Y G, *et al.* 980-nm high-power low-divergence VCSELs achieved by optimization of current density distribution [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2012, **48**(1): 42-48.