



795 nm亚波长光栅耦合腔垂直腔面发射激光器的超窄线宽特性

张福领 付丽珊 胡丕丽 韩文杰 王宏卓 张峰 关宝璐

Ultra-narrow linewidth characteristics of 795-nm subwavelength grating-coupled cavity vertical cavity surface emitting laser

Zhang Fu-Ling Fu Li-Shan Hu Pi-Li Han Wen-Jie Wang Hong-Zhuo Zhang Feng Guan Bao-Lu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 224207 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210293

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210293>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

表面液晶-垂直腔面发射激光器阵列的热特性

Thermal characteristics of surface liquid crystal vertical cavity surface emitting laser arrays

物理学报. 2020, 69(6): 064203 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191793>

基于单向注入垂直腔面发射激光器系统的密钥分发

Key distribution based on unidirectional injection of vertical cavity surface emitting laser system

物理学报. 2018, 67(20): 204202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181038>

高速850 nm垂直腔面发射激光器的优化设计与外延生长

Optimized design and epitaxy growth of high speed 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers

物理学报. 2018, 67(10): 104205 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172550>

940 nm垂直腔面发射激光器的设计及制备

Design and fabrication of 940 nm vertical-cavity surface-emitting lasers

物理学报. 2019, 68(6): 064207 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181822>

基于两正交互耦1550 nm垂直腔面发射激光器获取多路随机数

Multi-channel physical random number generation based on two orthogonally mutually coupled 1550 nm vertical-cavity surface-emitting lasers

物理学报. 2018, 67(2): 024204 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171902>

混沌光注入垂直腔面发射激光器混沌输出的时延和带宽特性

Performances of time-delay signature and bandwidth of the chaos generated by a vertical-cavity surface-emitting laser under chaotic optical injection

物理学报. 2017, 66(24): 244206 <https://doi.org/10.7498/aps.66.244206>

795 nm 亚波长光栅耦合腔垂直腔面发射激光器的超窄线宽特性*

张福领¹⁾ 付丽珊²⁾ 胡丕丽²⁾ 韩文杰¹⁾ 王宏卓²⁾ 张峰²⁾ 关宝璐^{2)†}

1) (中国电子科技集团公司第二十七研究所, 郑州 450047)

2) (北京工业大学 光电子技术教育部重点实验室, 北京 100124)

(2021 年 2 月 8 日收到; 2021 年 6 月 25 日收到修改稿)

基于共振耦合腔理论, 提出并设计了基于亚波长光栅耦合腔的 795 nm 垂直腔面发射激光器 (vertical cavity surface emitting laser, VCSEL), 利用 COMSOL 软件有限元方法对多光腔耦合线宽压窄机制和影响因素进行了详细分析, 研究发现, 当光子在多耦合腔中进行谐振时, 通过合理设计光栅耦合腔参数, 精确调控激光器多耦合腔相位匹配, 极大地促进了光谱线宽共振压窄效应, 并最终获得了高光束质量 795 nm VCSEL 激光器的超窄线宽输出. 理论结果表明, 当耦合腔间隔层厚度为 180 nm 时, 反射光谱冷腔线宽 $\Delta\lambda_c$ 可以达到 7 pm, 为实现 VCSEL 激光器 kHz 量级光谱线宽输出奠定了理论基础.

关键词: 共振耦合腔, 垂直腔面发射激光器, 超窄线宽, 亚波长光栅

PACS: 42.55.Px, 42.79.Kr, 42.25.Ja

DOI: 10.7498/aps.70.20210293

1 引言

随着大数据时代的来临, 光网络信息处理不断增加, 高密度宽带通信不断提高, 高性能垂直腔面发射激光器已成为不可或缺的核心组成部分, 被广泛地应用到光通信、3D 传感、光互连、光计算和医疗等领域中^[1-6]. 特别是随着原子钟、原子陀螺仪及光泵磁力仪等高新技术领域的不断发展^[7-9], 超窄线宽高光束质量 VCSEL 越来越成为人们关注的热点^[10-12]. 目前, 为了实现 VCSEL 激光器窄线宽光谱输出, 通常采用减小线宽展宽因子和增加激光器共振腔长等方法^[13], 例如, Moller 等^[14]在高频电流调制下减小 VCSEL 的线宽增强因子, 获得了 70 MHz 线宽输出. 为了进一步压窄线宽, Serkland 等^[15]通过增加 VCSEL 共振腔有效腔长, 将 VCSEL

线宽由 50 MHz 减小到 23 MHz. 同时, 人们还采用外腔反射镜结构设计, 比如 VCSEL 与凹面反射镜相结合, 形成了稳定的长光学谐振腔, 线宽可以压窄到 20 kHz^[16], 而 Mizunami 等^[17]将光纤布拉格光栅作为外腔反馈, 使其与 VCSEL 相互耦合, 经过外腔光栅的选择性, 激光器线宽可达到 902 Hz. 然而, 虽然通过增加激光器外腔长度的方法可以实现压窄线宽的目的, 但同时也使得激光器系统的体积急剧增加, 极大地降低了激光器集成度, 且系统更加复杂. 另一方面, 外腔系统促使 VCSEL 多纵模激射, 随着电流的变化往往会引起模式跳变, 并需要精确控制外腔光反馈强度, 以避免频谱线宽的漂移, 这也将增加外腔 VCSEL 激光器的实际操作难度, 而无法进一步降低器件集成度和成本. 针对现有 VCSEL 存在的输出偏振不稳定、窄线宽控制困难等问题, 本文提出了基于光栅耦合腔结构的窄

* 国家自然科学基金 (批准号: 60908012, 61575008, 61775007)、北京市自然科学基金 (批准号: 4172011) 和北京市教育委员会 (批准号: 040000546319525) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gbl@bjut.edu.cn

线宽 VCSEL 结构设计, 新结构器件由两部分组成: 一部分为具有光波相位调控功能的光栅耦合腔单元; 一部分为“半结构”的 VCSEL 结构, 由顶部 DBR、有源区光纵向耦合结构和底部 DBR 组成. 对于导模共振光栅耦合腔而言, 平面波入射经过亚波长光栅时发生衍射现象, 此时往往只有零级衍射波的存在, 其他的高级次衍射波成为倏逝波, 与导波所支持的导模相位相互匹配发生共振; 同时通过改变光栅耦合腔参数设计, 可以使中心波长在耦合腔和激光器谐振腔同时满足相位匹配, 激光器多光腔相互共振耦合, 从而有效减小共振波长范围, 实现共振波长的精确选择. 最终, 导模共振耦合腔与垂直腔面发射激光器组合形成新的谐振腔, 在同一波长处形成谐振, 使得反射谱冷腔线宽压窄到 6.78 kHz, 最终实现了 VCSEL 激光器光谱 kHz 量级超窄线宽输出, 为发展高光束质量超窄线宽 VCSEL 激光器提供了理论基础.

2 结构与工作原理

亚波长光栅共振耦合腔 VCSEL 激光器结构示意图如图 1 所示, 其结构包括光栅共振耦合腔和 VCSEL 激光器两部分. VCSEL 激光器结构中 DBR 由 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 层交替生长得到, 在光栅耦合腔与谐振腔之间的上 DBR 生长为 18 对, 下 DBR 为 34 对, 有源区则由 3 对 $\text{Al}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{As}/\text{Al}_{0.12}\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 量子阱层组成, 其和上、下 DBR 之间为 $\text{Al}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{As}$ 限制层. 光栅共振耦合腔中亚波长光栅层材料采用 MgF_2 , 占空比 f 为 0.5, 间隔层和波导层分别由 SiO_2 和 HfO_2 组成. 其中, 亚

波长光栅结构作为周期性衍射光学元件, 当光波入射经过亚波长光栅时发生零级次衍射, 而高级次衍射波将成为倏逝波, 在周期介质光栅调制作用下, 当倏逝波相位与耦合腔所支持的模式相位匹配时, 光栅中的光场能量重新分布, 并产生光栅耦合腔共振效应, 从而在特定波长处实现高反射率和超窄线宽反射谱. 一般来讲, 线宽展宽因子主要包含带间跃迁、带隙收缩和自由载流子吸收等对光谱线宽的影响, 因此, 由 VCSEL 输出光谱线宽表达式可知

$$\Delta\nu = \Delta\nu_{\text{ST}}(1 + \alpha^2), \quad (1)$$

其中, α 为线宽展宽因子, $\Delta\nu_{\text{ST}}$ 为自发辐射引起的线宽. 通过 Schawlow-Townes 线宽理论公式 (1) 可进一步表示为 [18]

$$\Delta\nu = (h\nu/P_0)(\nu/\lambda)^2(\pi\eta_0n_{\text{sp}})(\Delta\lambda_c)^2(1 + \alpha^2), \quad (2)$$

其中, $\Delta\lambda_c$ 是反射谱冷腔线宽, $h\nu$ 是光子能量, P_0 是输出光功率, n_{sp} 是粒子数反转因子, η_0 为光输出耦合效率. 从公式 (2) 中可以看出, 激光器输出线宽不仅与输出光功率 P_0 呈反比关系, 同时与反射光谱冷腔线宽 $\Delta\lambda_c$ 呈平方关系, 相比于输出功率对线宽具有更大影响. 同时, 反射光谱冷腔线宽 $\Delta\lambda_c$ 与激光器谐振腔品质因子密切相关, 而对于光栅耦合腔 VCSEL 来说, 通过优化耦合腔参数设计, 可以精确调控激光器多耦合腔相位匹配, 极大增强光子在多耦合腔中的共振耦合效应, 并提高激光器谐振腔品质因子, 因此, 基于耦合腔共振效应, 在谐振腔波长与耦合腔共振波长一致时, 可以形成激光器光波多耦合腔有效谐振, 使得反射谱线宽 $\Delta\lambda_c$ 进一步减小, 最终达到压窄激光器线宽的作用.

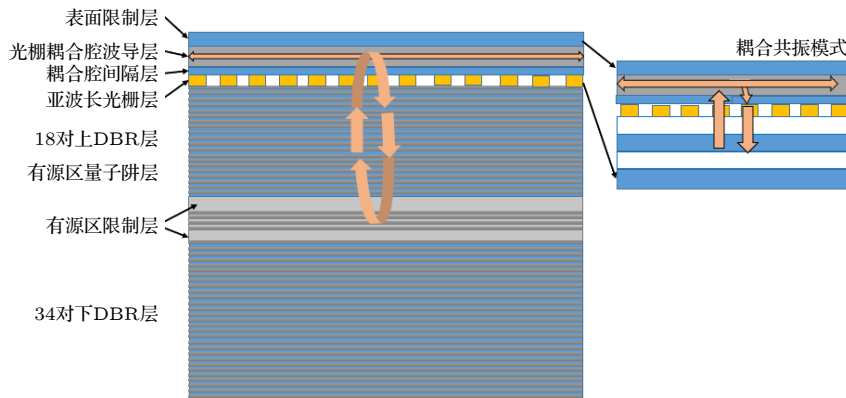


图 1 亚波长光栅耦合腔 VCSEL 激光器结构示意图

Fig. 1. Schematic diagram of subwavelength grating coupled cavity VCSEL laser structure.

3 结果与分析

图 2 为光栅周期和耦合腔间隔层对共振谱线的影响, 其中, 光栅厚度为 175 nm, 间隔层厚度为 150 nm, 基底层厚度为 400 nm. 从图 2 中可以看出, 随着光栅周期和间隔层厚度的增加, 耦合腔共振波长均将发生红移, 而光栅周期增加引起的共振波长红移比达到 1.6, 远大于间隔层引起的波长红移比 0.01. 同时, 共振光谱线宽随着间隔层的增加从 0.12 nm 减小到 0.09 nm, 而随着光栅周期的增加, 光谱线宽保持在 0.11 nm 不变. 这说明对于 795 nm 的中心波长来说, 亚波长光栅周期衍射效率更大地影响了共振波长位置, 而间隔层厚度更多影响了耦合腔的共振强度, 进而决定了线宽压窄程度.

相比于光栅耦合腔共振波长受到亚波长光栅周期影响, 激光器谐振腔共振波长同样受到多光腔耦合效应的影响, 如图 3(a) 所示, 随着 VCSEL 限制层厚度的变化, 有源区谐振波长在 795 nm 处出现非线性趋势, 这是因为当有源区谐振波长与光栅耦合腔谐振波长接近时, 多光腔耦合效应逐渐增强^[19], 使得有源区谐振波长发生红移. 为了实现激光器多光腔共振耦合, 使新型 795 nm VCSEL 激光器具有线宽压窄特性, 需要调控光栅耦合腔使其与激光器谐振腔共振波长一致, 进而实现耦合腔相位相互匹配. 光栅周期的变化将会改变光栅耦合腔的谐振波长, 并出现两个共振峰, 其中一个为有源区的谐振腔共振峰, 另一个为光栅耦合腔共振峰 (图 3(b) 插图). 如图 3(b) 所示, 当周期为 457.447 nm

时, 谐振腔耦合强度最大, 共振耦合波长为 795 nm, 且此时光栅耦合腔内部的电场值最大, 也就是说其电场值的半高全宽最窄. 同时, 从图 3(b) 中可以看出, 光栅周期对有源区谐振波长影响非常小, 因此, 通过改变光栅周期, 可以精确调控光栅耦合腔谐振波长使其与 VCSEL 有源区谐振在 795 nm 处高度一致, 从而使得耦合腔和有源区在 795 nm 处同时发生谐振, 二者相位相互匹配, 进而增强了光栅耦合腔在激光器中压窄线宽的作用^[20]. 耦合腔产生共振耦合时, 其多耦合腔共振电场各自达到最大值, 且各自电场值的半高全宽也达到最窄, 如图 3(c) 和图 3(d) 所示, 分别表示两个谐振腔相互耦合之后, 光栅耦合腔与有源区的电场光谱图.

图 4 为在不同间隔层厚度时, 光栅耦合腔与 VCSEL 谐振腔相位变化、反射谱及共振电场的强度分布. 从图 4 中可以看出, 随着间隔层厚度从 60 nm 增加到 180 nm, 激光器在 795 nm 共振中心波长处的相位斜率变化越来越大, 从 60 nm 时的 3.52 rad/nm 增加到 180 nm 时的 3831.17 rad/nm, 使得满足激光器耦合腔相位匹配的共振波长范围进一步减小, 表明耦合腔激光器的模式选择能力被逐渐提高^[21-23]. 另一方面, 从反射谱也可以看出, 激光器对耦合共振波长的透射越来越强, 反射率从 64.76% 减小到 4.29%, 中心波长处透射率趋近于 100%, 反射谱的线宽从 0.064 nm 减小到 0.007 nm, 线宽减小一个数量级, 达到了 pm 量级. 随着间隔层厚度的增大, 在有源区的共振电场值也进一步增大, 表明谐振腔能够更加精确地对 795 nm 的光波进行选择. 比较不同间隔层有源区的电场值, 间隔

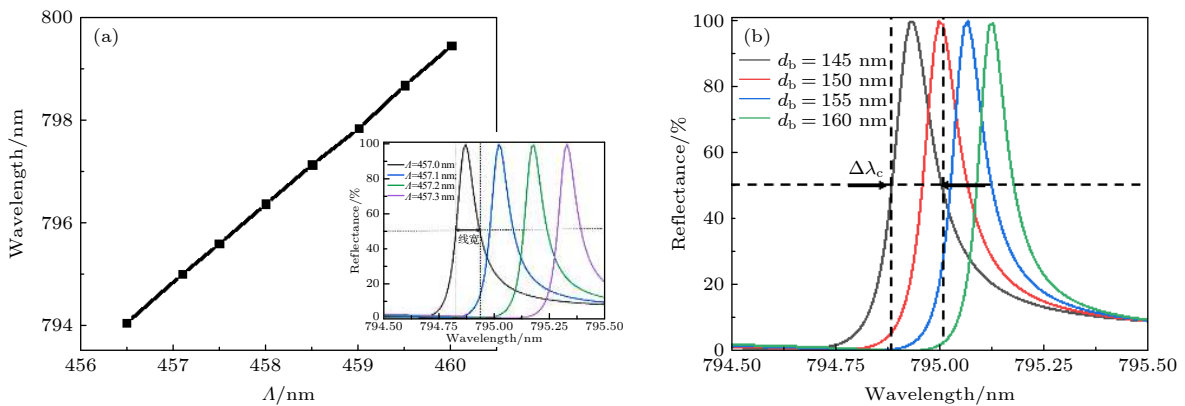


图 2 光栅结构参数对共振谱线的影响 (a) 改变光栅周期; (b) 改变间隔层厚度

Fig. 2. The influence of grating structure parameters on the resonance spectrum: (a) Change the grating period; (b) change the thickness of the spacer layer.

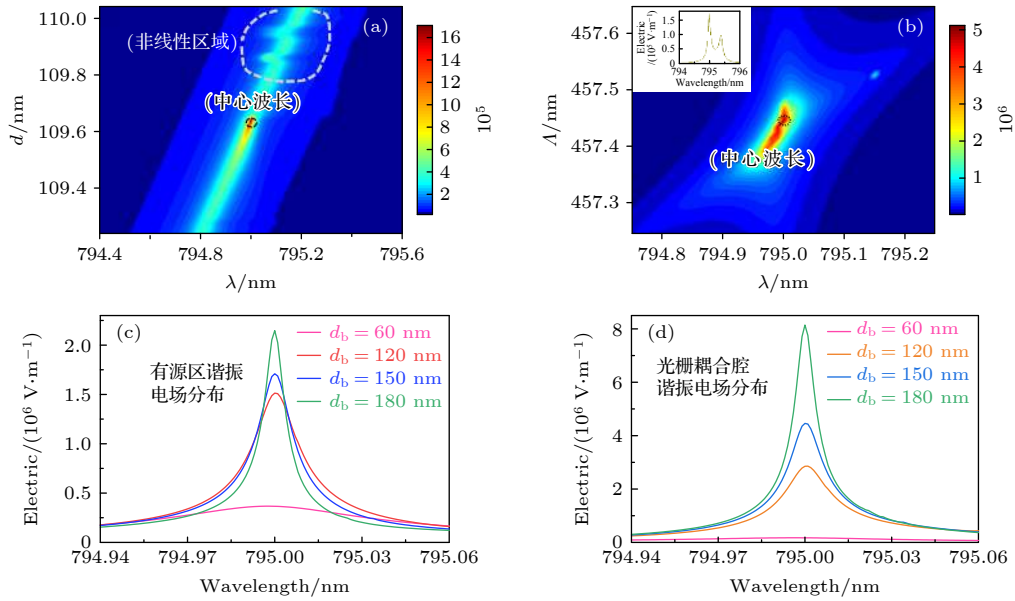


图 3 (a), (b) 两个谐振腔相互耦合的变化过程, 限制层厚度与光栅周期调节使其相互耦合; (c), (d) 相互耦合完成之后, 不同间隔层厚度亚波长光栅 VCSEL 有源区与光栅耦合腔的谐振电场分布

Fig. 3. (a) and (b) The variation process of the mutual coupling of the two resonant cavities, limiting the layer thickness and adjusting the grating period to make them coupled; (c) and (d) after the mutual coupling is completed, the subwavelength grating VCSEL with different spacing layer thickness is active Resonant electric field distribution of coupling cavity between zone and grating.

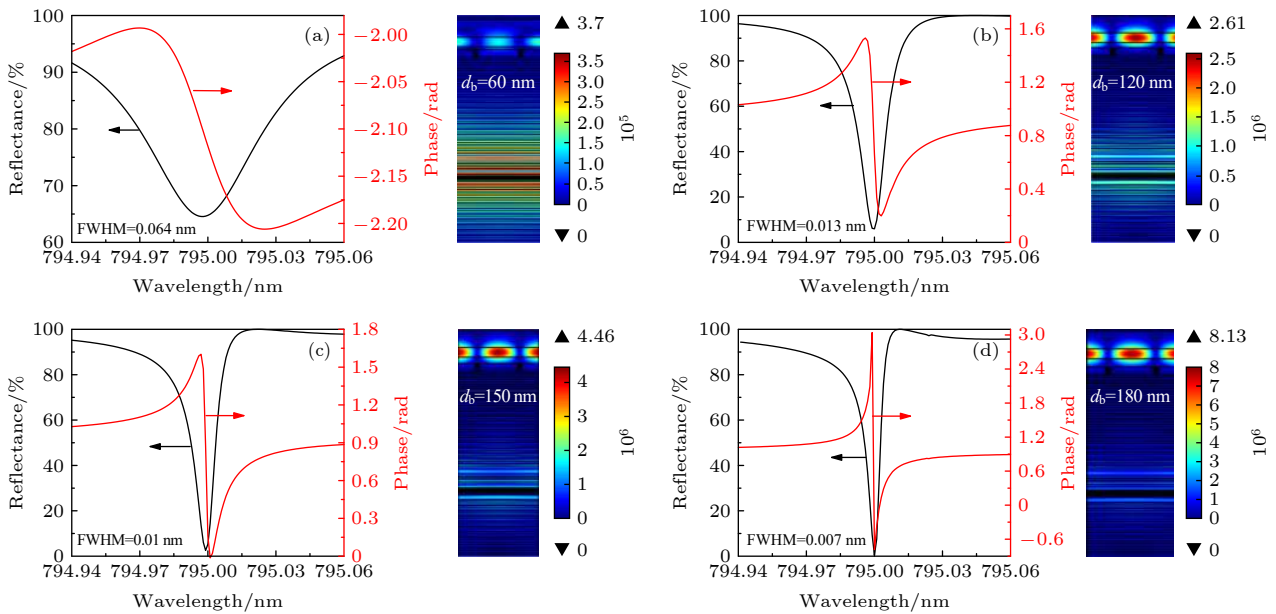


图 4 间隔层厚度不同时, 基于导模共振耦合腔的 VCSEL 的冷腔反射谱的半高全宽与光场分布图 (a) $d_b=60$ nm; (b) $d_b=120$ nm; (c) $d_b=150$ nm; (d) $d_b=180$ nm

Fig. 4. Full width at half maximum and optical field distribution of cold cavity reflection spectrum of VCSEL based on guided mode resonant coupled cavity when the thickness of the spacer layer is different: (a) $d_b=60$ nm; (b) $d_b=120$ nm; (c) $d_b=150$ nm; (d) $d_b=180$ nm.

层为 180 nm 的光栅耦合腔 VCSEL 在 795 nm 处的电场值比间隔层为 60 nm 的大约大了一个数量级. 有源区的电场光谱图与光栅耦合腔的变化趋势几乎一样, 随着间隔层厚度的增加, 795 nm 波长处的电场值越来越大, 在耦合腔内发生的共振现象也

越来越强. 光栅耦合腔 VCSEL 的谐振腔品质因子 Q 与耦合腔间隔层关系如图 5 所示, 在没有耦合腔作用的情况下, VCSEL 的 Q 值处于 10^3 量级, 为普通 VCSEL 激光器 Q 值平均水平. 当间隔层厚度为 60 nm 时, Q 因子上升到 10^4 量级, 随着耦合腔

间隔层厚度的增加, 耦合腔共振效应越来越显著, Q 因子逐渐增大; 当间隔层厚度增加到初始值的 3 倍时, Q 因子达到 10^5 量级, 比普通 VCSEL 腔增加了两个量级.

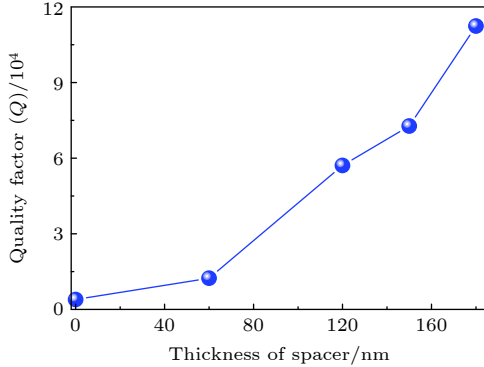


图 5 光栅耦合腔 VCSEL 品质因子 Q 与间隔层厚度变化关系

Fig. 5. The relationship between the quality factor Q of the grating coupled cavity VCSEL and the thickness of the spacer layer.

VCSEL 激光器输出光谱线宽不仅受到谐振腔冷腔线宽和线宽展宽因子的影响, 同时与激光器输出光功率相关, 根据 Schawlow-Townes 线宽理论公式 (1) 可以得到光谱线宽与谐振腔冷腔线宽和输出光功率的变化关系, 如图 6 所示, 其中光子能量 $h\nu \approx 1.5$ eV, 自发发射因子 $n_{sp} \approx 2.6$, 有源区材料的线宽增强因子取 $\alpha \approx 3$ ^[24]. 通过理论计算分析与光栅耦合腔模拟结果对比可以得到: 对于普通 VCSEL 激光器, 谐振腔冷腔线宽 $\Delta\lambda_c$ 一般大于 0.2 nm, 对于输出光功率小于 1 mW 的 VCSEL 激光器, 其输出光谱线宽可达到 1 GHz 以上; 而对于基模 VCSEL 激光器谐振腔来说, 线宽 $\Delta\lambda_c$ 会进一步减小, 输出光谱线宽将小于 GHz, 达到几十 MHz. 但是从图 6 可以看出, 需要进一步增加光输出功率, 甚至达到百 mW 以上, 光谱线宽才能小于 MHz. 然而, 研究表明, 对于小孔径单模 VCSEL 激光器而言, 实现百 mW 输出往往非常困难^[19]. 与此同时, 对于光栅耦合腔 VCSEL 来说, 由于在共振耦合腔效应作用下, 其谐振腔冷腔线宽可以达到 0.01 nm 以下, 如图 6 所示, 在相同输出光功率 10 mW 的情况下, 当光栅耦合腔 VCSEL 的 $\Delta\lambda_c$ 为 0.064 nm 时, 激光器输出光谱线宽达到 1.811 MHz, 比传统 VCSEL 线宽小 2 个数量级以上. 如上所述, 在光栅共振耦合腔作用下, 当 $\Delta\lambda_c$ 达到 0.007 nm

时, 激光器输出光谱线宽可以减小到 21.67 kHz, 线宽压窄达 98.8%. 同样, 对于小功率输出情况下, 如当输出功率为 100 μ W 时, 其输出光谱线宽也在 1 MHz 左右, 远小于传统基模 VCSEL 的光谱线宽, 因此, VCSEL 在小功率输出情况下也可以获得超窄线宽的高光束质量输出成为可能.

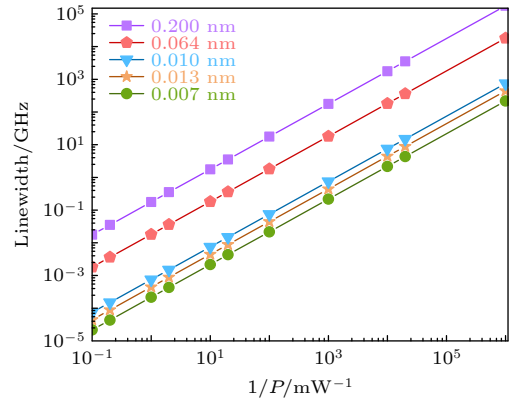


图 6 光栅耦合腔 VCSEL 输出线宽与光功率关系

Fig. 6. The relationship between the output line width of the grating coupled cavity VCSEL and the optical power.

4 结 论

随着原子钟、原子陀螺仪及光泵磁力仪等高新技术领域的不断发展, 超窄线宽高光束质量 VCSEL 越来越成为人们的研究热点. 本文基于多耦合腔共振理论, 提出并设计了光栅耦合腔 795 nm VCSEL 激光器, 利用有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 详细研究了光栅周期、耦合腔间隔层、激光器限制层等对耦合腔共振波长和光谱线宽的影响, 精确调控耦合腔光波相位匹配, 实现了光栅耦合腔与 VCSEL 谐振腔的共振耦合, 进一步增强了谐振腔对波长的精确选择, 得到了更窄线宽的 VCSEL 反射谱. 光栅耦合腔 VCSEL 线宽达到了 kHz 量级, 与传统激光器相比, 减小了 3 个数量级以上, 为实现超窄线宽 VCSEL 激光器奠定了良好的理论基础.

参考文献

- [1] Boletti A, Boffi P, Martelli P, Ferrario M, Martinelli M 2015 *Opt. Express* **23** 1806
- [2] Ghiasi A 2015 *Opt. Express* **23** 2085
- [3] Nakahama M, Sakaguchi T, Matsutani A, Koyama F 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 091110
- [4] Liu A J, Wolf P, Lott J A, Bimberg D 2019 *Photonics Res.* **7** 121
- [5] Li M J, Li K M, Chen X, Snigdharaj K M, Adrian A J, Jason

- E H, Jeffery S S 2021 *J. Lightwave Technol.* **39** 868
- [6] Chen B, Claus D, Russ D, Nizami R 2020 *Opt. Lett.* **45** 5583
- [7] Schwindt P D, Lindseth B J, Shah V, Knappe S, Kitching J 2008 *Conference on Lasers and Electro-Optics* San Jose, United States of America, May 4–9, 2008 p1
- [8] Serkland D K, Geib K M, Peake G M, Lutwak R, Rashed A, Varghese M, Tepolt G, Prouty M *Vertical-cavity Surface-emitting Lasers XI* San Jose, February 12–13, 2007 p648406
- [9] Khan N A, Mahmood T 2020 *J. Mod. Optic.* **67** 1334
- [10] Paul S, Haidar M T, Cesar J, Malekizandi M, Kögel B, Neumeyr C, Ortsiefer M, Küppers F 2016 *Opt. Express* **24** 13142
- [11] Jiang L D, Shi L L, Luo J, Gao Q R, Lan T Y, Huang L G, Zhu T 2021 *Opt. Lett.* **46** 2320
- [12] Schawlow A L, Townes C H 1940 *Phys Rev.* **112** 1940
- [13] Henry C H 2015 *IEEE J. Quantum. Elect.* **18** 259
- [14] Moller B, Zeeb E, Fiedler U, Hackbarth T, Ebeling K 1994 *IEEE Photonic Tech. L.* **6** 921
- [15] Serkland D K, Keeler G A, Geib K M, Peake G M 2009 *Proc. Spie.* **7229** 8
- [16] Ouvrard A, Garnache A, Cerutti L, Genty F, Romanini D 2005 *IEEE Photonic Tech. L.* **17** 2020
- [17] Mizunami T, Kojima S, Kudo T 2006 *The International Society for Optical Engineering* Gwangju, Korea, September 5, 2006 p6351
- [18] Hessel A, Oliner A A 1965 *Appl. Opt.* **4** 1275
- [19] Ura S, Kintaka K, Inoue J, Ogura T, Awatsuji Y *Electronic Components and Technology Conference IEEE* Las Vegas, United States of America, May 28–31, 2013 p1874
- [20] Aspelmeyer M, Kippenberg T J, Marquardt F 2014 *Florian. Rev. Mod.* **86** 1391
- [21] Theisen M J, Brown T G 2015 *J. Mod. Optic.* **62** 244
- [22] Vartiainen I, Tervo J, Kuittinen M 2009 *Opt. Lett.* **34** 1648
- [23] Inoue J, Ogura T, Kondo T, Kintaka K, Nishio K, Awatsuji Y 2014 *Opt. Lett.* **39** 1893
- [24] Haglund Erik, Jahed Mehdi, Gustaysson Johan S, Larsson A, O'Brien P 2019 *Opt. Lett.* **27** 18892

Ultra-narrow linewidth characteristics of 795-nm subwavelength grating-coupled cavity vertical cavity surface emitting laser*

Zhang Fu-Ling¹⁾ Fu Li-Shan²⁾ Hu Pi-Li²⁾ Han Wen-Jie¹⁾

Wang Hong-Zhuo²⁾ Zhang Feng²⁾ Guan Bao-Lu^{2)†}

1) (*The 27th Institute of CETC, Zhengzhou 450047, China*)

2) (*Laboratory of Opto-electronics Technology, College of Electronic Information and Control Engineering, Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124*)

(Received 8 February 2021; revised manuscript received 25 June 2021)

Abstract

In this paper, the 795-nm vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) with sub-wavelength grating coupled cavity is proposed and designed based on the theory of resonant coupled cavity, and the mechanism of multi-cavity coupling linewidth narrowing and influencing factors are analyzed in detail by using the COMSOL software finite element method. The analysis results show that when photonic resonance takes place in a multi-coupled cavity, the grating-coupled cavity with reasonable design parameters and the multi-coupled cavity formed by precisely controlled lasers are phase-matched, which greatly strengthens the narrowing effect of the spectral linewidth resonance, and a 795-nm VCSEL laser with high beam quality and ultra-narrow linewidth output is obtained, finally. Theoretical results display that the reflection spectrum cold cavity linewidth $\Delta\lambda_c$ of the coupling cavity with a thickness of 180nm of the spacer layer can reach 7 pm, which lays a theoretical foundation for achieving a kHz-level spectral linewidth output of VCSEL lasers.

Keywords: resonant coupled cavity, vertical cavity surface emitting laser, ultra-narrow linewidth, subwavelength grating

PACS: 42.55.Px, 42.79.Kr, 42.25.Ja

DOI: [10.7498/aps.70.20210293](https://doi.org/10.7498/aps.70.20210293)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60908012, 61575008, 61775007), the Natural Science Foundation of Beijing City, China (Grant No. 4172011) and the Beijing Municipal Commission of Education of China (Grant No. 040000546319525).

† Corresponding author. E-mail: gbl@bjut.edu.cn