

中红外半导体激光器腔面膜的研究现状

刘 乐, 秦宪超, 曲 轶*, 孙国玉

海南师范大学, 海南 海口

收稿日期: 2022年5月5日; 录用日期: 2022年6月3日; 发布日期: 2022年6月10日

摘 要

3~5 μm 波段是重要的大气窗口, 该波段内的4.6 μm 半导体激光器广泛应用于痕量气体检测、自由空间光通信和定向红外对抗等领域。随着4.6 μm 半导体激光器应用领域的不断拓展, 对器件的性能要求越来越高。腔面膜是半导体激光器的一个重要但是相对薄弱的器件工艺。随着半导体激光器输出光功率的提升, 以及波长向中远红外推进, 具有抗激光损伤和高稳定性的光学薄膜成为制约半导体激光器进一步发展的主要因素之一。薄膜的激光损伤阈值、环境稳定性、宽带隙、应力影响、吸收损耗、散射损耗、机械强度等因素都会影响薄膜在激光器中的性能。本文主要总结了4.6 μm 波段附近半导体激光器腔面膜的报道。

关键词

高反膜, 增透膜, 薄膜制备技术, 半导体激光器

Research Status of Cavity Masks for Mid-Infrared Semiconductor Lasers

Le Liu, Xianchao Qin, Yi Qu*, Guoyu Sun

Hainan Normal University, Haikou Hainan

Received: May 5th, 2022; accepted: Jun. 3rd, 2022; published: Jun. 10th, 2022

Abstract

3~5 μm band is an important atmospheric window. 4.6 μm semiconductor lasers in this band are widely used in the fields of trace gas detection, free space optical communication and directional infrared countermeasure. With the continuous expansion of the application field of 4.6 μm semiconductor laser, the demand for the performance of the device is higher and higher. Cavity surface

*通讯作者。

coating is an important but relatively weak device process of semiconductor laser. With the further increase of the output optical power of the semiconductor laser and the promotion of the wavelength to the middle and far infrared, the optical thin film with anti-laser damage and high stability has become one of the factors limiting the further development of the semiconductor laser. The laser damage threshold, environmental stability, wide band gap, stress effect, absorption loss, scattering loss, mechanical strength and other factors will affect the performance of the thin film in the laser. This paper mainly summarizes the reports of thin films on the cavity surface of semiconductor lasers near 4.6 μm wave band.

Keywords

High Reflective Film, Antireflective Film, Thin Film Preparation Technology, Semiconductor Laser

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

20 世纪 60 年代以来, 随着各种激光器的出现, 激光器的研究开始飞速发展, 包括固体激光器、气体激光器、半导体二极管等。半导体激光二极管体积小、重量轻、寿命长, 因此受到研究人员的关注。科学家们先后成功研制近红外、可见、紫外、短波中红外 pn 结注入双极型半导体激光二极管。这一发展影响了整个光电子学, 使得半导体激光二极管成为光电子学发展的重要环节, 也为信息产业的发展提供了帮助。然而, 由于现实中缺少合适的半导体材料, 结型带间跃迁机制这一方法很难在中红外波段、长波段和远红外波段起作用[1]。20 世纪 80 年代初期, 强电场下多量子阱中量子化的电子态之间实现光放大的概念首次被提出[2]。美国贝尔实验室 Capass [3]和加拿大国家科学院 Liu [4]进一步完善了该理论, 1994 年发明了第一个量子级联激光器[5]。在高功率输出时, 半导体激光器有源区量子阱中的功率密度可以达到 10^{10} W/cm^3 量级[6], 然而转换效率的问题使得输入的电能存在部分损失, 并以热量形式散发, 不仅影响性能, 有时还会发生灾变性损伤, 使激光器失效。腔面薄膜制备技术则是解决激光器中失效问题的有效方法。对于边发射半导体激光器, 通常用半导体激光器芯片的解理面作为谐振腔, 通过对半导体激光器芯片材料进行解理后形成两个相对平行的解理腔面, 在前后腔面上分别镀上高反射膜和增透膜, 形成激光谐振腔镜, 如图 1 所示[6] [7]。

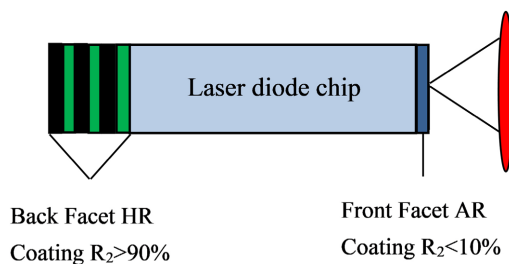


Figure 1. Schematic diagram of coating on the cavity surface of edge-emitting semiconductor lasers [6] [7]

图 1. 边发射半导体激光器腔面镀膜示意图[6] [7]

基于超晶格、量子阱理论和分子束外延(MBE)技术, 贝尔实验室在 1994 年发明的第一个量子级联激光器(QCL)。使用的是 InP 基 GaInAs/AlInAs 材料体系, 其材料体系的激射波长覆盖了中红外全波段。由于量子级联激光器的激射波长覆盖 3~5 μm 和 8~14 μm 两个重要的大气窗口, 并可以向远红外波段拓展[1], 故其在远距离气体检测、自由空间光通信、医疗诊治、红外对抗等方面有着非常大的应用需求, 其中 4.6 μm 半导体激光器在 CO 气体检测与自由空间光通信等方面扮演着重要角色。中国工程院于 2018 年启动了“我国激光技术与应用 2035 发展战略研究”重点咨询项目, 分析了我国激光技术在前沿激光、制造加工、信息通信、医疗诊治等领域的科研和应用的发展现状, 梳理了多个制约加速发展的问题, 对中红外半导体激光器的发展提出了新的目标[8]。

2. 国内外研究现状

中红外半导体激光器越来越广泛应用于各个领域[9], 然而其腔面膜的优化设计和制备是使其性能提升的关键技术之一。根据波动光学理论, 当光线以 0° 入射到 InP-Air 界面时, 界面对光线的反射率不到 30%。故对于未镀膜的 InP 基半导体激光器, 有近 70% 的激光能量未得到有效利用, 极大限制了器件的输出光功率的提升。通过在激光器芯片解理面镀膜, 一方面可实现芯片单面输出高功率激光, 另一方面可有效保护腔面, 从而提升器件的可靠性和寿命[10]。由于基底为 InP 材料以及中心波长处于中红外波段, 一般的半导体激光器腔面增透膜膜系仅满足单波长增透, 而对于宽光谱可调谐中红外半导体激光器腔面多波长增透膜需要设计多层膜才能满足要求。

从公开发表的文章和资料来看, 关于中红外波段的 4.6 μm 半导体激光器腔面膜的设计和制备的研究报道较少。而已报道的相关研究主要涉及的是镀制腔面膜后器件的输出功率和稳定性会有所提升, 但并未具体叙述腔面膜的制备工艺及光学特性。国外的美国西北大学和国内的中科院半导体所等单位, 对中红外半导体激光器进行了大量研究, 近十年来器件的性能有很大提升[11]。下面主要是关于波长 4.6 μm 附近量子级联半导体激光器腔面膜的相关报道。

2.1. 后腔面高反膜

在激光器芯片解理面镀制高反膜, 可实现激光器单面输出高功率激光。随着激光器激射波长变长, 对薄膜的设计及制备都提出了新的要求。薄膜的层数及厚度变大, 引起的应力和缺陷都会严重影响激光器的稳定性。相比 808 nm、980 nm 半导体激光器腔面膜, 4.6 μm 半导体激光器腔面全介质高反膜设计的层数需达到 6 层, 薄膜总厚度接近 3 μm 。由于多层膜内电场强度分布不均匀, 腔面损伤会影响芯片性能, 而金属膜可以在总厚度为几百纳米就能达到 98% 的反射率。但因为金属膜与大多衬底的附着力差, 需要加镀缓冲层增强薄膜的附着力。半导体激光器后腔面镀制高反膜, 对器件性能有显著提高。

2003 年, 美国西北大学通过电子束热蒸发在激射波长为 6 μm 的宽 15 μm 、长 2 mm 腔端面蒸镀 $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{Ti}/\text{Au}$ ~500 nm/15 nm/80 nm 高反膜, 实现温度分别在 293 K 和 308 K 下输出功率达到 132 mW 和 21 mW [12], 其中 Ti 薄膜的厚度会影响反射率峰值, 但也会增强金薄膜与衬底的附着力, 大多只设计为十几纳米厚度。2005 年, 法国的 S. Forget 等人实现了 9 μm 附近室温下连续激射的高性能 InP 基量子级联激光器, 通过镀制 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Au}$ 高反射涂层, 输出功率达到 175 mW [13], Al_2O_3 物理性质稳定, 电子束蒸发不易分解, 相对于 Y_2O_3 做缓冲层性能优异。通过后腔面镀制高反膜越来越成为提高激光器性能的一种途径。2008 年, 韩国的 Jae Su Yu 等人实现了高性能室温连续输出 4.6 μm 量子级联激光器, 在 4 mm 长的腔端面镀制高反膜, 占空比为 65% 时, 输出功率达到 633 mW, 室温下连续输出功率能达到 469 mW [14]。2010 年, 美国西北大学的 Q. Y. Lu 等人在 5 mm 腔长的激光器后腔面镀制高反膜, 实现激射波长为 4.75 μm 室温连续输出功率达到 1.1 w 的 DFB 量子级联激光器[15]。2020 年, 美国西北大学量子器件中心报道了

一种大功率连续波单模量子级联激光器，波长覆盖范围 3.8~8.3 μm ，前后腔面分别镀制了 580 nm Y_2O_3 和 400 nm 100 nm $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{Au}$ 薄膜，最高输出功率可达 5 W [16]。

国内涉及中远红外半导体激光器腔面膜的报道，基本是以 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}/\text{Au}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜系为主的介质——金属高反膜。为了增强金薄膜的附着力在 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}/\text{Au}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜系的基础上加镀了一层 Ti 膜。2009 年，中科院半导体所刘峰奇在激射波长为 4.6 μm 的 12 μm 宽、2 mm 长腔端面采用电子束热蒸发镀制了 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}/\text{Au}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (200/10/80/100 nm) 高反膜，室温连续输出功率 77 mW，阈值电流密度 1.45 KA/cm^2 [17]。在激射波长相同的情况下，腔面高反膜的光特性与腔长关系不大，主要与衬底材料折射率有关。2012 年中科院半导体所张锦川等人采用电子束蒸发在激射波长为 4.6 μm InP 基不同腔长芯片端面镀制 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}/\text{Au}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (200/10/100/120 nm) 高反膜，测试结果显示，镀制高反膜的 2 mm 腔长的激光器，室温连续输出功率 125 mW，阈值电流密度 0.86 kA/cm^2 [18]。2017 年，中科院半导体所赵越等人实现 4.7 μm 高功率量子级联激光器，在背光面镀制反射率为 95% 的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}/\text{Au}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (200/10/100/120 nm) 高反膜，出光面未镀膜，室温下连续输出功率达到 130 mW [19]。

以 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}/\text{Au}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 为基础膜系的腔面高反膜，对不同结构的半导体激光器性能也有有显著提升。2013 年，中科院半导体研究所刘峰奇等人通过后腔面镀制 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}/\text{Au}/\text{Ti}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (200/10/100/10/120 nm) 高反膜，实现了 4.8 μm 大功率 DFB 半导体量子级联激光器，输出功率达到 0.63 W。同年，中科院张锦川等人在 3 mm 腔长面发射激光器背光面镀制 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}/\text{Au}/\text{Ti}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (200/10/100/10/120 nm) 高反膜，10 $^\circ\text{C}$ 温度下连续输出功率达到 105 mW，阈值电流密度为 0.85 kA/cm^2 [20]。2017 年，贾志伟等人实现了激射波长 4.65~4.89 μm 小角度锥形结构掩埋式光栅 DFB 量子级联激光器，镀制了 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}/\text{Au}/\text{Ti}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (200/10/100/10/120 nm) 高反膜，室温连续输出功率超过 130 mW [21]。

如图 2 所示为常用的 4.6 μm 附近半导体激光器腔面高反膜反射率光谱图，腔面高反膜常用的金属材料大多为 Au。由于金薄膜附着力差且质软，需要加镀 Al_2O_3 或 Y_2O_3 作为缓冲层和保护层，缓冲层的厚度在一定范围内会影响峰值反射率。通常也会在镀金薄膜前加镀一层十几纳米厚的 Ti 膜层，以增强金薄膜的附着力。而加镀 Ti 薄膜后对反射率影响不大，如图 3 中 b 曲线是加镀 Ti 薄膜，相对未加镀 Ti 薄膜的 a 曲线，其反射率在长波会略有降低。用 Au 材料设计的高反膜反射带宽覆盖整个中红外波段，理论反射率高于 99%，而且膜层总厚度在 500nm 左右，避免了薄膜太厚引起的应力及缺陷累积问题。

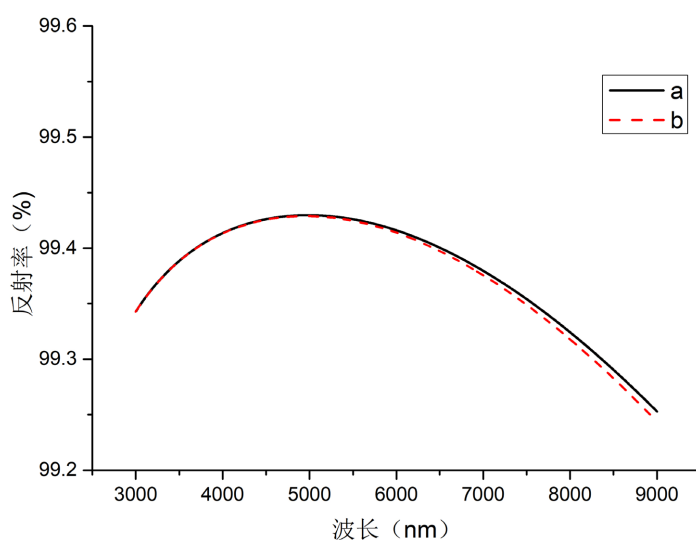


Figure 2. Reflectance spectrum simulation graph
图 2. 高反膜反射率光谱仿真图

2.2. 前腔面增透膜

半导体激光器芯片解理面镀制增透膜作为谐振腔出光面，而增透膜可以提高器件的输出光功率。理论上，半导体激光器腔面增透膜的反射率在 2%~10%之间，一般设计为单层或双层增透膜，而对于宽波段增透膜需要设计多层膜才能满足要求。

对于半导体激光器芯片解理面镀制增透膜对器件输出光功率以及光学损伤阈值的研究。2009 年，美国的 Richard Maulini 等人研究了 4.6 μm 处不同厚度的单层 Al_2O_3 增透膜对制冷量子级联激光器性能的影响。在后腔面镀制高反膜的条件下， Al_2O_3 的厚度从 350 nm~500 nm 以 30 nm 的增量增加，增透膜的反射率从 16%~7%变化，器件峰值功率从未镀膜 3.9 W 提升到 4.4 W [22]，如图 3 所示。2017 年，美国西北大学量子器件中心报道了一种镀制 ZnSe/MgF_2 ~800 nm/1400 nm 减反膜的激射波长 6.1~9.2 μm 广泛可调中红外量子级联激光器，最高峰值功率可达到 65 mW [23]。2018 年，美国西北大学报道了一种基于量子级联激光器的单模 16 通道光学相控阵，使用了该结构的 QCL，并镀制反射率低于 1%的单层 Y_2O_3 增透膜，在 4.8 μm 波长处的单模激光峰值输出功率达到 30 W。2012 年，美国 Arkadiy Lyakh 等人在锥形 4.7 μm 量子级联激光器的前腔面镀制了单层 Al_2O_3 增透膜，并测得前腔面的光学损伤阈值为 10 MW/cm^2 ，激光器输出功率最高达 4.5 w [24]。

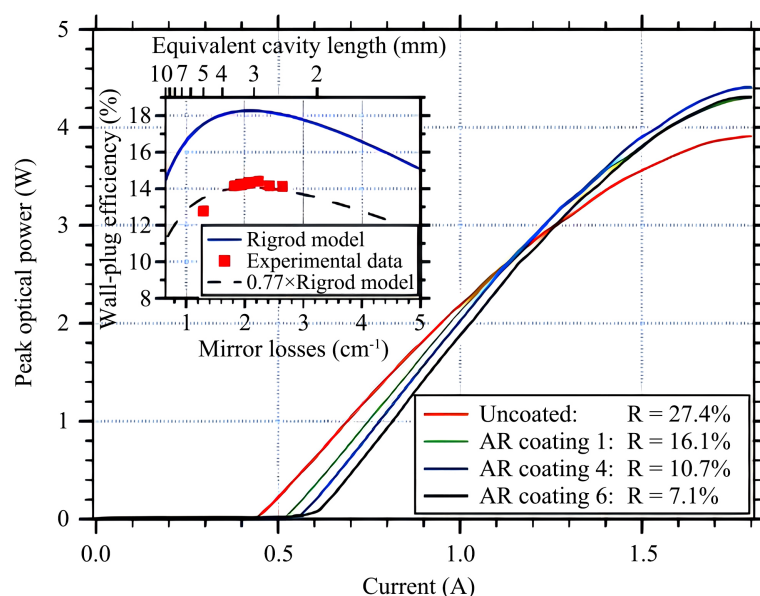


Figure 3. P-I curves of AR coatings with different thicknesses

图 3. 不同厚度的增透膜 P-I 曲线图

半导体激光器腔面增透膜常用的是单层 Al_2O_3 、 Y_2O_3 材料。对于中红外半导体激光器所用的衬底 InP 材料，其晶格常数： $a = 0.589 \text{ nm}$ ，热膨胀系数 4.6×10^{-6} [25]。结合 Y_2O_3 与 Al_2O_3 的相关性质， Al_2O_3 与 InP 衬底的晶格匹配要比 Y_2O_3 的好，但 Y_2O_3 的折射率大于 Al_2O_3 ，在波长 4.6 μm 处增透的情况下， Al_2O_3 薄膜厚度要大于 Y_2O_3 薄膜，而 Al_2O_3 与 Y_2O_3 具有相似的物理性质，制备出的薄膜性能都很优异 [26] [27] [28]。在 2018 年，德国柏林洪堡大学 Yohei Matsuoka 等人报道了一种中红外宽光谱多层增透膜，其膜层结构为 $\text{YF}_3/\text{ZnS}/\text{Ge}/\text{ZnS}$ (1796 nm/168 nm/89 nm/586 nm)，该增透膜在 8~12 μm 光谱范围内的反射率低至 0.75% [29]。该中红外宽带增透膜可用于中红外波段可调谐量子级联激光器腔面膜，但该膜系的设计以及制备相比单波长增透膜要复杂的多。

3. 总结

半导体激光芯片通过解理形成的两个相对平行的解理面构成激光器谐振腔, 而对于 InP 衬底的腔面反射率只有 30% 左右, 存在严重的损耗, 通过腔面镀制合适的光学薄膜可以很好地解决这个问题。半导体激光器腔面膜光传输不同于一般的传输模式, 激光是从有源区激射向空气, 腔面膜的驻波场强峰值位于最里层与相邻层的交界面上, 损伤几率大。而中远红外半导体激光器后腔面高反膜一般为多层膜, 其第一层膜也是选择抗激光损伤阈值高且附着力好的 Al_2O_3 , 前腔面增透膜多选择抗激光损伤阈值高的 Al_2O_3 、 Y_2O_3 单层膜。对于中红外多波长增透膜, 其层数是根据反射率要求以及减反射带宽决定, 随着半导体激光器工作波长向远红外以及宽光谱可调谐发展, 对前腔面增透膜的要求会越来越高。

基金项目

项目资助信息: 海南省重大科技计划(ZDKJ2019005)、海南省研究生创新科研课题(Hys2020-330)、海南省自然科学基金(618QN241, 2019RC169, 121QN228, 519MS051、120MS031)、海南省院士创新平台科研专项项目(YSPTZX202034)、国家自然科学基金(61774024, 61864002, 61964007, 11764012)、中国工程科技发展海南研究院咨询研究(19-HN-XZ-07)、海南省重点研发项目(JDYF2020020, JDYF2020036, JDYF2020217)、海南省高等学校科学研究项目(Hnky2020-24)。

参考文献

- [1] 宋淑芳, 邢伟荣, 刘铭. 量子级联激光器的原理及研究进展[J]. 激光与红外, 2013, 43(9): 972-976.
- [2] Kazarinov, R.F. and Suris, R.A. (1971) Possibility of the Amplification of Electromagnetic Waves in a Semiconductor with a Super-Lattice. *Soviet Physics. Semiconductors*, **5**, 707-709.
- [3] Capasso, F. (1987) Band Gap Engineering; from Physics and Materials to New Semiconductor Devices. *Science*, **235**, 172-176. <https://doi.org/10.1126/science.235.4785.172>
- [4] Liu, H.C. (1988) A Novel Superlattice Infrared Source. *Journal of Applied Physics*, **63**, 2856-2858. <https://doi.org/10.1063/1.340939>
- [5] Faist, J., Capasso, F., Sivco, D.L., et al. (1994) Quantum Cascade Laser. *Science*, **264**, 553-556. <https://doi.org/10.1126/science.264.5158.553>
- [6] Tamm, J.W., Ziegler, M., Hempel, M., et al. (2011) Mechanisms and Fast Kinetics of the Catastrophic Optical Damage (COD) in GaAs-Based Diode Lasers. *Laser & Photonics Reviews*, **5**, 422-441. <https://doi.org/10.1002/lpor.201000023>
- [7] 李再金. 半导体激光器腔面光学膜关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2010.
- [8] 我国激光技术与应用 2035 发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 1-6.
- [9] 王超臣, 刘瑞科, 王廷予, 李森森, 周冠军, 白振旭, 王雨雷, 吕志伟. 红外半导体激光器应用[J]. 激光杂志, 2020, 41(8): 1-10.
- [10] 牛江丽. 掺氢非晶硅对高功率半导体激光器腔面钝化的研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2009.
- [11] 刘峰奇, 张锦川, 刘俊岐, 卓宁, 王利军, 刘舒曼, 翟慎强, 梁平, 胡颖, 王占国. 量子级联激光器研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 79-91.
- [12] Yu, J.S., Slivken, S., Evans, A., et al. (2003) High-Power Continuous-Wave Operation of a 6 μm Quantum-Cascade Laser at Room Temperature. *Applied Physics Letters*, **83**, 2503-2505. <https://doi.org/10.1063/1.1613354>
- [13] Forget, S., Faugeras, C. and Bengloan, J.Y. (2005) High-Power Spatial Single Mode Quantum Cascade Lasers at 8.9 μm . *Electronics Letters*, **41**, 418-419. <https://doi.org/10.1049/el:20058046>
- [14] Yu, J.S., Slivken, S., Evans, A.J., et al. (2008) High-Performance Continuous-Wave Operation of Quantum-Cascade Lasers above Room Temperature. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **44**, 747-754. <https://doi.org/10.1109/JQE.2008.924434>
- [15] Lu, Q.Y., Bai, Y., Bandyopadhyay, N., Slivken, S. and Razeghi, M. (2010) Room-Temperature Continuous Wave Operation of Distributed Feedback Quantum Cascade Lasers with Watt-Level Power Output. *Applied Physics Letters*, **97**, Article ID: 101105. <https://doi.org/10.1063/1.3525859>

- [16] Razeghi, M., Lu, Q., Slivken, S., *et al.* (2020) High Power Continuous Wave Operation of Single Mode Quantum Cascade Lasers up to 5 W Spanning $\lambda \sim 3.8\text{-}8.3\ \mu\text{m}$. *Optics Express*, **28**, 15181-15188. <https://doi.org/10.1364/OE.393069>
- [17] Liu, F.-Q., Li, L., Wang, L.J., *et al.* (2009) Solid Source Mbe Growth of Quantum Cascade Lasers. *Applied Physics A—Materials Science & Processing*, **97**, 527-532. <https://doi.org/10.1007/s00339-009-5423-8>
- [18] Zhang, J.C., Liu, F.Q., Tan, S., *et al.* (2012) High-Performance Uncooled Distributed-Feedback Quantum Cascade Laser without Lateral Regrowth. *Applied Physics Letters*, **100**, Article ID: 112105. <https://doi.org/10.1063/1.3693425>
- [19] Zhao, Y., Zhang, J.C., Zhuo, N., *et al.* (2017) Broad Area Quantum Cascade Lasers Operating in Pulsed Mode above 100 °C at $\lambda \sim 4.7\ \mu\text{m}$. *Journal of Semiconductors*, **38**, Article ID: 074005. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/38/7/074005>
- [20] Zhang, J.C., Liu, F.Q., Yao, D.Y., *et al.* (2013) High Power Buried Sampled Grating Distributed Feedback Quantum Cascade Lasers. *Journal of Applied Physics*, **113**, Article ID: 153101. <https://doi.org/10.1063/1.4801906>
- [21] Jia, Z.W., *et al.* (2017) Improvement of Buried Grating DFB Quantum Cascade Lasers by Small-Angle Tapered Structure. *IEEE Photonics Technology Letters*, **29**, 783-785.
- [22] Maulini, R., Lyakh, A., Tsekoun, A., *et al.* (2009) High Power Thermoelectrically Cooled and Uncooled Quantum Cascade Lasers with Optimized Reflectivity Facet Coatings. *Applied Physics Letters*, **95**, Article ID: 101105. <https://doi.org/10.1063/1.3246799>
- [23] Zhou, W.J., *et al.* (2017) High Performance Monolithic, Broadly Tunable Mid-Infrared Quantum Cascade Lasers. *Optica*, **4**, 1228-1231. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.4.001228>
- [24] Lyakh, A., Maulini, R., Tsekoun, A., *et al.* (2012) Tapered 4.7 μm Quantum Cascade Lasers with Highly Strained Active Region Composition Delivering over 4.5 Watts of Continuous Wave Optical Power. *Optics Express*, **20**, 4382-4388. <https://doi.org/10.1364/OE.20.004382>
- [25] 朱天雄. AlGaInAs/InP 应变补偿量子阱激光器的研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- [26] 王松林, 杨崇民, 张建付, 刘青龙, 黎明, 米高园, 王慧娜. 基底温度对电子束蒸发制备氧化铝薄膜的影响[J]. *应用光学*, 2013, 34(5): 764-767.
- [27] 杨辉, 张玲洁, 郭国忠, 杨理博, 沈建超, 吴梦怡, 林志建. 透明氧化铝薄膜的疏水性能研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2010, 39(S2): 232-235.
- [28] 徐尚君. 蓝宝石表面氧化钇薄膜的制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [29] Matsuoka, Y., Mathonnère, S., Peters, S., *et al.* (2018) Broadband Multilayer Anti-Reflection Coating for Mid-Infrared Range from 7 μm to 12 μm . *Applied Optics*, **57**, 1645-1649. <https://doi.org/10.1364/AO.57.001645>