

腔面反射对锥形激光器光束质量的影响

游道明^{1,2}, 谭满清^{1,2*}, 陈文彬^{1,2}, 刘维华^{1,2}¹中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083;²中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049

摘要 高功率下光束质量恶化问题制约着锥形激光器的发展, 基于腔面光学薄膜, 研究了腔面反射对光束质量的影响。建立了不包含抗反射结构的物理模型, 采用锥形激光器的电光模型进行仿真, 分析了不同腔面反射率下器件的光场分布。结果表明, 在传统锥形激光器中, 存在强烈的光泵、光束成丝、自聚焦和空间烧孔效应, 来自腔面的剩余反射引发了上述非线性效应, 最终影响光束质量。前腔面反射在此过程中起着关键作用, 后腔面同样对光束质量有较大影响。通过优化腔面反射率, 提出了两种优化路径, 部分设计的光束质量因子小于 2, 实现了高光束质量。研究结果为锥形激光器的设计提供了参考。

关键词 激光器; 锥形激光器; 腔面反射; 光学薄膜; 光束质量

中图分类号 TN248.4 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL220661

1 引言

半导体激光器具有体积小、寿命长、转换效率高等优势, 高功率半导体激光器被大规模应用于泵浦光纤、固态激光器、直接材料加工、空间激光通信等领域^[1]。主流的大功率半导体激光器普遍存在光束质量差的问题^[2]。为了提高光束质量, 外腔激光器、板耦合激光器、倾斜腔激光器和锥形激光器被相继提出^[3-5]。其中, 锥形激光器具有光束质量高、功率大、集成度高等优势, 受到广泛关注。

锥形激光器由脊形激光器和锥形光放大器单片集成, 脊形激光器产生的单模种子光耦合进入锥形放大器获得增益后, 在宽度渐变的锥形波导中传输时, 光束逐渐扩展, 内部光功率密度大幅降低, 可实现瓦级近衍射极限输出。尽管锥形激光器的光束质量远优于普通高功率半导体激光器, 然而高功率下的光束质量恶化严重制约锥形激光器的发展。

高功率下的锥形激光器存在强烈的光泵、空间烧孔等非线性效应, 腔面反射被认为是重要的影响因素^[6-7]。来自高反射率腔面的剩余反射影响光场分布, 反射光在腔内反复振荡, 锥形激光器特殊的波导结构加剧了局域折射率和增益的波动, 引发了上述非线性效应, 使得光束质量恶化^[8-9]。研究发现, 较低的前腔面反射率有助于改善腔内光场的不均匀分布, 削弱空间烧孔和光束成丝效应。降低后腔面反射率也能够有效抑制光泵效应, 并大幅提高光束质量^[10-13], 然而腔面

反射对光束质量的具体影响机制还不明确。

为了提高锥形激光器中的光束质量, 研究者相继提出了抗反射凹槽、光束扰流器和光栅等, 这些设计普遍存在结构和工艺复杂的问题^[14]。而光学薄膜与现有工艺兼容, 半导体激光器通常采用高性能的光学薄膜来改变腔面反射率, 其中增透膜能够有效消除反射光的影响。基于光学薄膜改善锥形激光器光束质量的研究不断被报道。

本文研究了腔面反射对锥形激光器光束质量的影响。建立了锥形激光器的物理模型, 并采用准三维电光模型进行了仿真, 通过分析不同腔面反射率下腔内的光场分布, 研究了非线性效应等影响光束质量的因素。通过优化腔面反射率, 本文提出了两种优化路径, 部分优化设计的光束质量因子低于 2。相比于以往的方案, 所提方案无需改变器件整体结构, 仅需通过光学薄膜调整腔面反射率, 即可同时获得瓦级的高输出功率和高光束质量。所提方案为锥形激光器的设计提供了参考。

2 仿真模型

2.1 锥形激光器的物理模型

锥形激光器由脊形和锥形两部分构成, 如图 1 所示, 其中脊形部分(RW section)为脊波导激光器, 锥形部分(tapered section)为锥形波导结构的半导体光放大器。脊形部分和锥形部分直接耦合, 交界处两侧波导形状和尺寸的差异较大, 波导不连续将影响光场分

收稿日期: 2022-03-14; 修回日期: 2022-04-08; 录用日期: 2022-05-07; 网络首发: 2022-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(61935018)

通信作者: *mqtan@semi.ac.cn

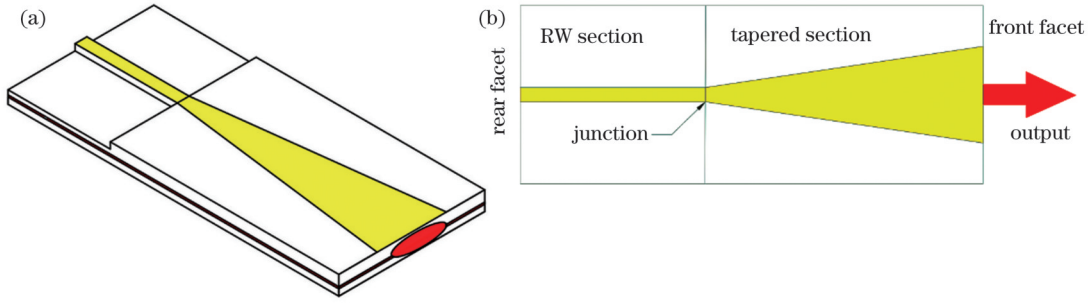


图 1 锥形激光器的典型结构。(a)三维示意图;(b)平面示意图
Fig. 1 Typical structure of tapered lasers. (a) 3D diagram; (b) plane diagram

布。脊形部分通常采用折射率导引的设计,而锥形部分通常采用增益导引的设计,导引机制对光束质量也有较大影响^[15]。光束经由靠近锥形部分的前腔面(front facet)输出,而脊形部分一侧为后腔面(rear facet),前后腔面上布置有光学薄膜。

建立了锥形激光器的物理模型,其结构如图 2 所

示。为了获得准确的腔面反射与光束质量的关系,需要减少器件结构的影响。因此,设置脊波导长度(L_{RW})为 1 mm,脊宽(W_{RW})控制在 $3\ \mu\text{m}$,具有良好的滤波性能;锥角设置为 3° ,锥形部分长度(L_{tapered})则为 1 mm,与种子光衍射角相匹配并具有足够的增益大小^[16-17],前腔面宽度(W_{out})为 $55\ \mu\text{m}$ 。

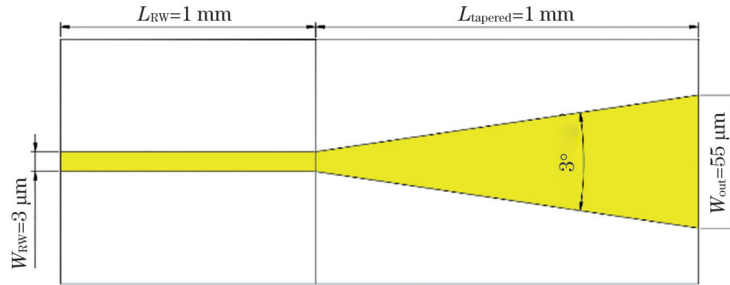


图 2 锥形激光器的物理模型
Fig. 2 Physical model of tapered lasers

2.2 锥形激光器的电光模型

为了提高锥形激光器的光束质量,不仅需要深入理解其中的影响因素,还需要建立高效的仿真模型。完整的锥形激光器仿真应包括光、电、热等多维模型,考虑到腔面的反射对热分布的影响相对有限,因此采用绝热的准三维电光模型。锥形激光器中电极的设置也会影响输出特性^[18],本文采用共面电极的设置。首先确定锥形激光器的边界条件,边界处的正向场 $E_+(x, y, l)$ 和反向场 $E_-(x, y, 0)$ 与后腔面反射率(R_r)和前腔面反射率(R_f)的关系^[19]为

$$E_+(x, y, l) = \sqrt{R_r} \cdot E_-(x, y, 0), \quad (1)$$

$$E_-(x, y, 0) = \sqrt{R_f} \cdot E_+(x, y, l), \quad (2)$$

式中: x, y 为腔面各点的横、纵坐标; l 为激光器在 z 方向上的长度即腔长。

除边界条件外,还需确定折射率分布,折射率(ϵ)与载流子浓度(n_r)、增益系数(g)间满足:

$$\epsilon = n_r + i \frac{g - \alpha}{2k_0}, \quad (3)$$

式中: k_0 为波矢大小; α 为损耗系数。通过泊松方程求解载流子分布,利用式(1)~(3)可以得到折射率,然后利用光束传播法(BPM)计算光场分布。BPM通过上

述的折射率和边界条件,采用有限差分法(FDM)求解波导方程,获得给定边界条件下腔内传播方向不同位置处的光场分布。仅考虑单色波,所求解的标量 Helmholtz 方程^[20]为

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + k_0^2(x, y, z) \cdot \phi = 0, \quad (4)$$

式中: ϕ 为场量; (x, y, z) 为点坐标。在光束传播方向上,场量的相位变化较快,因此需要引入缓变场量 ϕ' :

$$\phi(x, y, z) = u(x, y, z) \exp(i\bar{k}z), \quad (5)$$

式中: $\exp(i\bar{k}z)$ 表示相位变化; \bar{k} 为常数,表示平均相位变化; $u(x, y, z)$ 为初设场。由于 $u(x, y, z)$ 的幅值变化小,忽略其在方向上的二阶导数,将近似后的缓变场量代入即可得到等效 Helmholtz 方程:

$$2i\bar{k} \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{i}{2\bar{k}} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + (k^2 - \bar{k}^2)u \right]. \quad (6)$$

通过计算初设场 $u(x, y, z)$,BPM 基于式(6)进行求解,可以得到不同位置处的光场变化,在此基础上引入界面反射和传输矩阵,能够获得前向和后向光场的传播参数。

基于有源区电子跃迁的速率方程,考虑载流子输

运和吸收、散射损耗及非辐射复合等,建立稳态和瞬态数值分析模型,模拟锥形激光器的输出特性。

光束质量用光束质量因子(M^2)表示,定义为实际光束和基模高斯光束的束腰宽度与远场发散角乘积的比值, M^2 满足^[21]:

$$M^2 = \frac{\pi \cdot w \cdot \Theta}{4\lambda}, \quad (7)$$

式中: w 是水平方向上光束的束腰直径,锥形激光器中束腰位于器件内部; Θ 是水平方向上的远场发散角; λ 是波长。 M^2 直观反映光束质量的高低,理想的基模高斯光束的 M^2 为1,实际光束的 M^2 大于1,光束质量因子越小,则光束质量越高。

本文利用BPM、Poisson方程和电流连续性方程建立准三维电光模型。首先在锥形激光器内沿光束传播方向划分许多仿真区域,通过增加仿真区域的数量并优化关键位置处的区域划分来提高计算的精度。针对每个仿真区域,第一步是利用一维光子速率方程计算光子密度,第二步使用FDM求解波动方程,获得入射光截面上的光场分布,然后通过第一步获得的光子密度计算出射截面上的载流子分布和增益系数,再由此计算折射率分布。由此获得了该区域内的电光参数,采用该方法遍历锥形激光器腔内所有仿真区域,并通过BPM联系相邻区域内的光束传播参数。该模型模拟光束在谐振腔内反馈的过程,每完成一次反馈,判断光子密度和光场分布是否在误差内,通过不断迭代,优化计算过程,最终达到收敛并输出仿真结果。

3 结果分析与讨论

本文研究了腔面反射率和光束质量的关系,基于上述电光模型和物理模型进行仿真。为了消除结构等因素的影响,仅改变腔面反射率。理论上光学薄膜能够实现光的全透过和全反射,然而受镀膜工艺和膜层可靠性的限制,目前已实现的腔面反射率为0.01%~99.00%,在该范围内设定腔面反射。锥形激光器输出功率达到瓦级,满足研究要求。

传统锥形激光器采用前腔面镀增透膜、后腔面镀高反膜的设计,通常前腔面反射率 R_f 为5%,后腔面反射率 R_r 为95%。与普通半导体激光器类似,脊形与锥形部分构成谐振腔,这意味着除波导内限制的光束外,在高功率下,大量来自腔面的反射光也将在前后腔面间反复振荡获得增益,这极大地影响了锥形激光器的光束质量。图3展示了腔内的光场分布,其中 x 轴为侧向, z 轴为腔内的传输方向,其中 z 在0~1000 μm 区间对应脊形部分, z 在1000~2000 μm 区间对应锥形部分,虚线标记了波导轮廓。需要说明的是,由于模型通过沿 z 在轴划分仿真区域并计算参数,因此图3中相对强度仅表示 z 轴微小区域内平面 xy 上的光强分布,并非平面 xz 的强度分布。

图3中光场呈多瓣分布,大量旁瓣光未被波导限

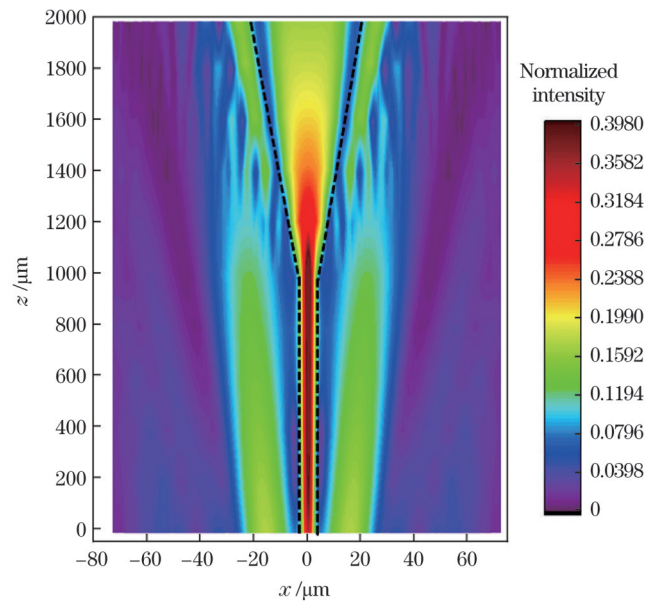


图3 传统锥形激光器腔内沿传输方向的光场分布
Fig. 3 Field distribution along transmission direction in cavity of traditional tapered lasers

制,其在波导外传输并改变材料的带隙,甚至使得能带饱和,在脊波导两侧形成对称的光传输通道,呈现强烈的光泵效应。脊形与锥形部分交界处的光场不连续,种子光未完全耦合进入锥形波导中,在波导外侧传输,极大地影响了输出光束的模式特性,因此传统锥形激光器的光束质量较差。

3.1 前腔面反射的影响

传统锥形激光器中前腔面的反射率较高,本文研究了来自前腔面的剩余反射与腔内光泵、光束成丝等现象的关系,保持后腔面反射率不变($R_r = 95\%$)。表1列出了较高前腔面反射率($R_f = 10\% \sim 32\%$)器件的仿真结果,存在显著的光泵效应、空间烧孔(SHB)和光束成丝现象,并呈多模输出。

重点研究了低反射率的情况,选取了 R_f 为0.01%~5.00%的仿真结果,前腔面、交界处和后腔面的光场分布如图4所示。受剩余反射的影响,前向波和后向波的光场与增益不匹配,图4(a)所示的前腔面光场分布显示波形严重畸变,由于锥形波导对畸变波前的散射,形成了高阶模式。除光场变化外,反射光还引起局部增益的变化。图4(b)中交界处由于光场集中在中央,载流子消耗较大,改变了局部折射率,形成的折射率差使得光场更加集中,引发自聚焦和空间烧孔现象,在高功率下形成光束成丝。上述多种效应对光场产生综合作用,影响种子光的光束质量。

如图4(a)所示,随着反射率的降低,前腔面光场中的旁瓣强度大幅减弱,尤其是 R_f 降至0.01%后,波导内的光强显著提高,波导外侧的旁瓣光几乎消失。图4(b)也显示远离波导的旁瓣光得到有效抑制,然而波导内仍存在双峰激射,这表明在由前腔面和交界所包围的锥形部分中,光场仍呈强烈的局域集中分布。

表 1 前腔面反射率对光束质量的影响

Table 1 Effect of R_f on beam quality

$R_f / \%$	$R_r / \%$	Side lobe peak / %	Beam quality	Main feature of nonlinear effect
32	95	18.5	Poor	Optical pumping, filamentation, and SHB
20	95	18.2	Poor	Optical pumping, filamentation, and SHB
15	95	17.0	Poor	Optical pumping, filamentation, and SHB
10	95	9.8	Poor	Optical pumping and weak filamentation

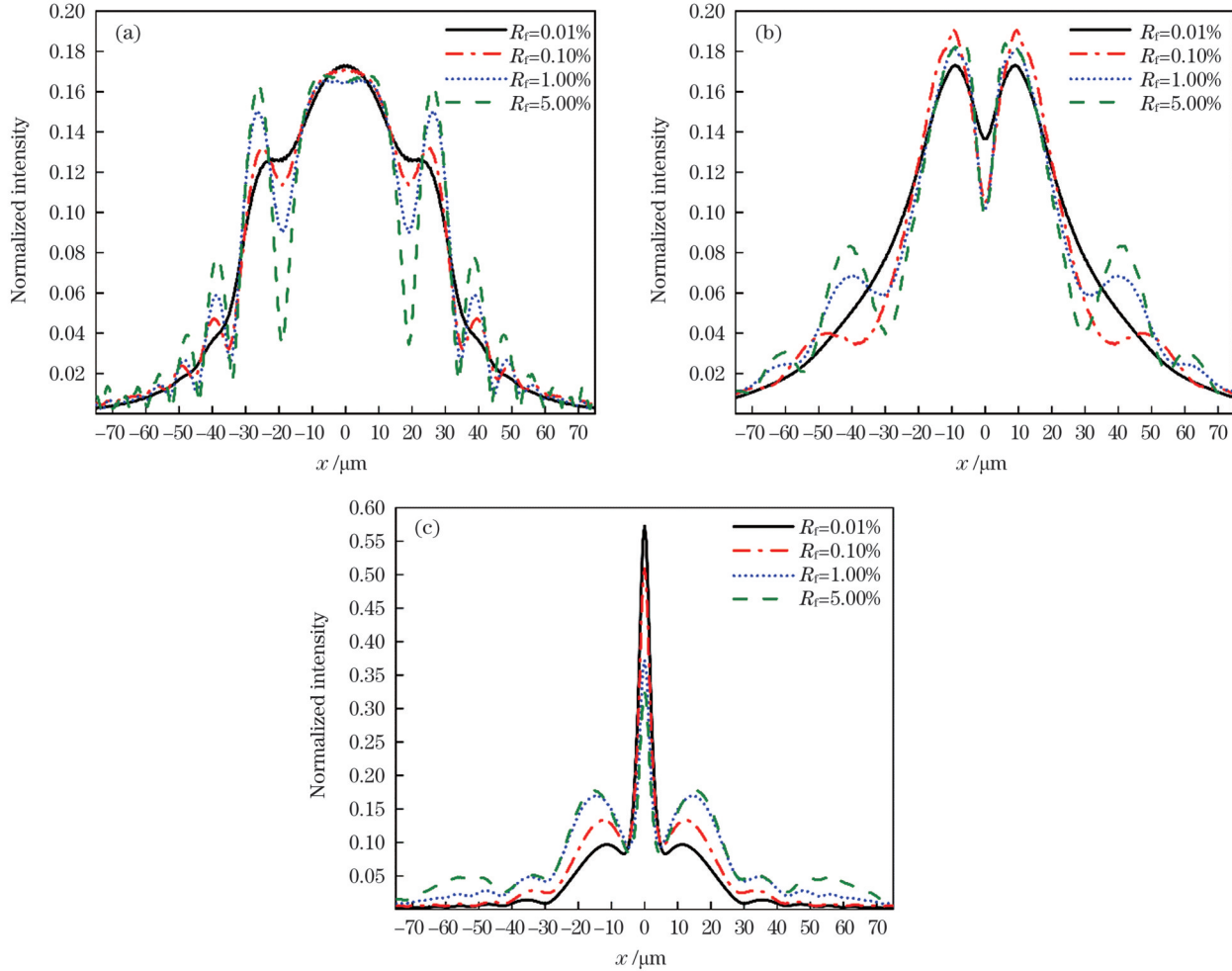


图 4 R_f 为 0.01%~5.00% 时的腔内光场分布。(a) 前腔面; (b) 交界处; (c) 后腔面

Fig.4 Field distributions in cavity when R_f is 0.01%–5.00%. (a) Front facet; (b) junction; (c) rear facet

图 4(c) 所示的后腔面光场显示, 随着反射率的降低, 脊波导两侧的旁瓣强度大幅降低, 光泵效应被削弱。这表明脊波导能够有效限制光束, 光束经滤波后输入到锥形部分中, 光束质量获得提升。

前腔面反射影响锥形激光器特别是锥形部分的光场分布, 通过降低反射率能够有效改善器件的光束质量, 但是在后腔面反射率较高的情况下, 仅改变前腔面反射率无法完全消除光泵和空间烧孔现象。为了进一步提高光束质量, 需要考虑其他途径, 如优化后腔面反射率。

3.2 后腔面反射的影响

传统锥形激光器中后腔面反射率较高, 光束在腔内不断振荡。与普通半导体激光器不同, 由于锥形和

脊形部分在波导形状和尺寸上的巨大差异, 这种振荡将引发非线性效应并影响光束质量。研究了后腔面反射与光束质量的关系, 保持前腔面反射率不变 ($R_f = 5\%$), 图 5 所示为不同后腔面反射率的锥形激光器的光场分布 ($R_r = 1\% \sim 95\%$)。图 5(a) 和图 5(b) 分别为交界处和后腔面的光场分布, 更多信息如表 2 所示。

在反射率较高的情况下, 如图 5 所示, 交界处波导内形成波谷, 中央光强显著低于两侧旁瓣, 并且在远离波导的外侧区域出现旁瓣, 这是由于后腔面反射较强, 光泵效应仍存在, 持续引发交界处的自聚焦和空间烧孔效应。如图 5(b) 所示, 后腔面波导两侧存在高能量的旁瓣, 意味着光泵效应较强, 大量旁瓣光被后腔面反

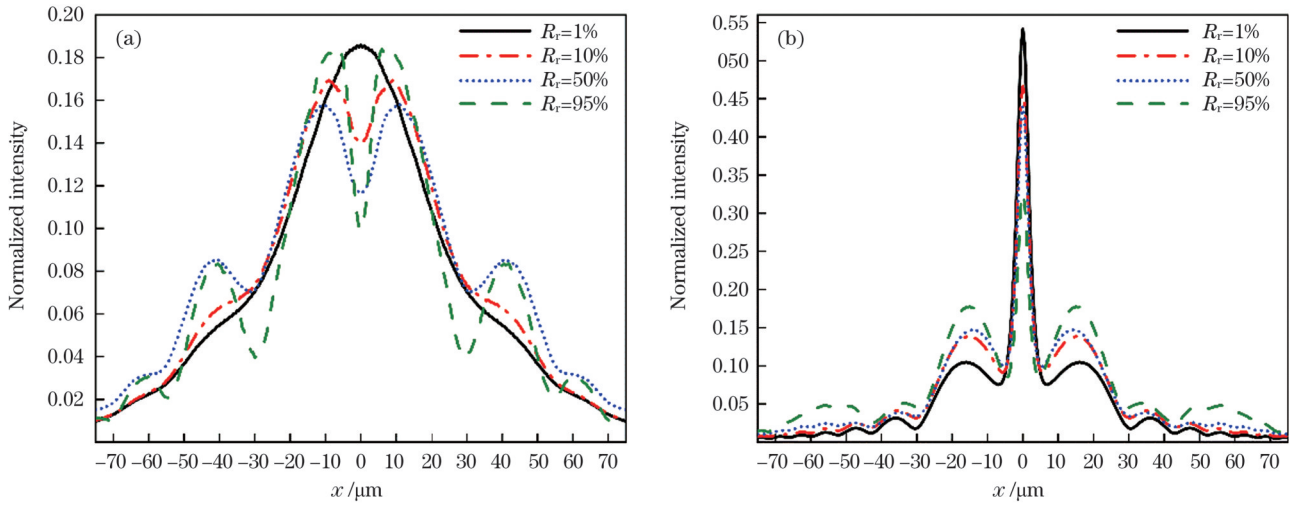


图 5 R_r 为 1%~95% 时的腔内光场分布。(a) 交界处; (b) 后腔面
Fig. 5 Filed distributions in cavity when R_r is 1%~95%. (a) Junction; (b) rear facet

表 2 后腔面反射对光束质量的影响
Table 2 Effect of R_r on beam quality

R_f / %	R_r / %	Side lobe peak / %	Beam quality	Main feature of nonlinear effect
5	99	22.4	Poor	Optical pumping, filamentation, and SHB
5	90	15.0	Poor	Optical pumping, filamentation, and SHB
5	50	14.6	Poor	Optical pumping, weak filamentation, and SHB
5	32	12.7	Poor	Optical pumping

射,经脊波导外侧无源区域传输后到达交界处,受该处波导不连续性的影响,产生多旁瓣,并引发空间烧孔。随着 R_r 的减小,后腔面反射光的能量减小,旁瓣强度和数量显著降低,光泵效应被削弱,光场的不均匀分布得到大幅改善,特别是 R_r 降至 1% 后,交界处的波谷完全消失,波导所限制的光束能量大幅提高。

图 6 对比了前腔面的光场分布。随着后腔面反射率的降低,前腔面上的旁瓣被大幅削弱,这与图 5 中交界处和后腔面光场的情况是相符的,锥形激光器腔内的光泵、空间烧孔和自聚焦效应得到抑制,输出光的光

束质量得到提高。如图 6(a) 所示,当反射率降至较低水平 ($R_r = 10\%$ 和 $R_r = 1\%$) 时,靠近波导边缘的两侧出现对称的光场尖峰,呈现显著的蝙蝠耳 (Top-Hat) 分布,这阻碍了光束质量的进一步提高。相比图 6(a),图 6(b) 中的光场分布出现巨大差异,波导外的旁瓣几乎被完全消除,波导内的光场也更加均匀。特别是当反射率降至 1% 后,Top-Hat 分布得到抑制,前腔面的光场非常接近单瓣,锥形激光器趋于基模输出,具有高光束质量。图 6(a)、(b) 的对比表明,在相同条件下,前腔面反射在光束质量的变化中起着更为关键的作用。

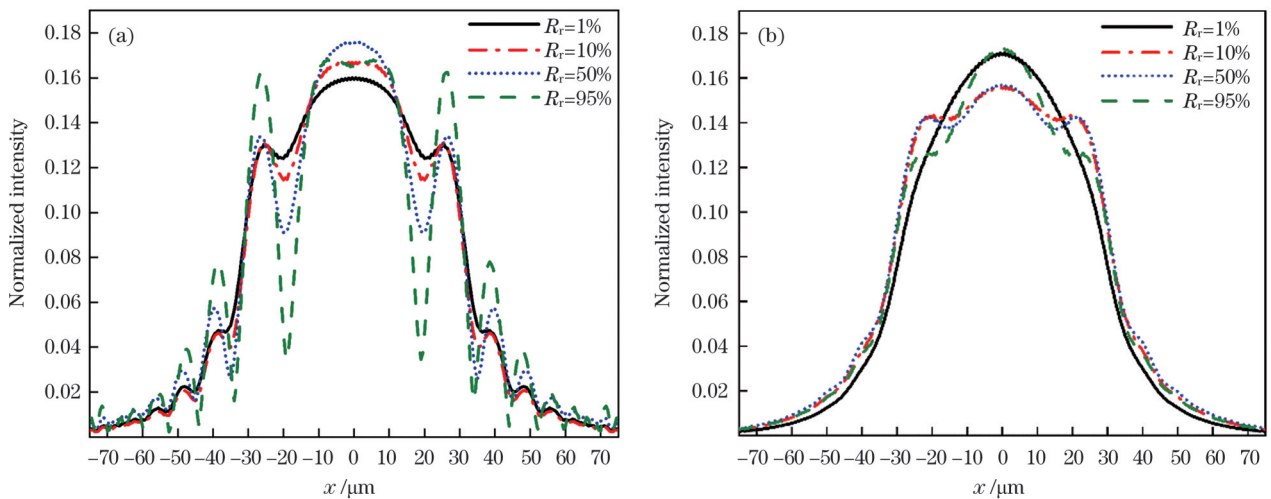


图 6 不同 R_r 下的前腔面光场分布。(a) $R_r = 5\%$; (b) $R_r = 0.01\%$
Fig. 6 Filed distributions of front facet with different R_r . (a) $R_r = 5\%$; (b) $R_r = 0.01\%$

后腔面反射较强的锥形激光器中存在光泵、空间烧孔和自聚焦效应等,通过降低后腔面反射率,能削弱上述非线性效应,腔内光场分布变得更为均匀,特别是配合较低的前腔面反射率,能够获得高光束质量的输出。需要指出的是,由于反射率减小,脊形部分输出的种子光强度降低,这将影响包括功率和阈值电流在内的输出特性。

3.3 腔面反射率的优化

为了提高锥形激光器的光束质量,本文基于前述研究提出两条优化路径。其一是将前腔面反射率 R_f 降至极低的水平 ($R_f = 0.01\%$),即使在较大的后腔面反射率范围内 ($R_r = 1\% \sim 90\%$),锥形激光器仍能保持较高的光束质量。仿真结果表明,前腔面反射对光束质量的影响更大,在 R_f 为 0.01% 的情况下,腔内的

光场分布得到大幅改善,结合后腔面反射率的优化,能够进一步抑制腔内的非线性效应,从而实现高光束质量。选取了其中两种优化设计,图 7 所示为其光场分布。由于仿真区域是沿 z 轴方向划分的,图 7 中的归一化强度仅表示平面 xy 内的光强分布,不代表整个腔内的相对强度。相较于图 3 所示的传统锥形激光器,图 7 中脊波导两侧的旁瓣强度和分布范围显著减小,意味着光泵效应减弱,光场被重新限制在波导内部,大部分高阶模被脊波导滤除,种子光具有更好的光束质量,因此在图 7(b) 中,后腔面附近的旁瓣强度和分布范围大幅减小,光束成丝也几乎被消除,实现了高光束质量。仿真显示,在后腔面反射率降至 10% 以下后,光束质量仍可获得小幅提升,更多信息如表 3 所示。

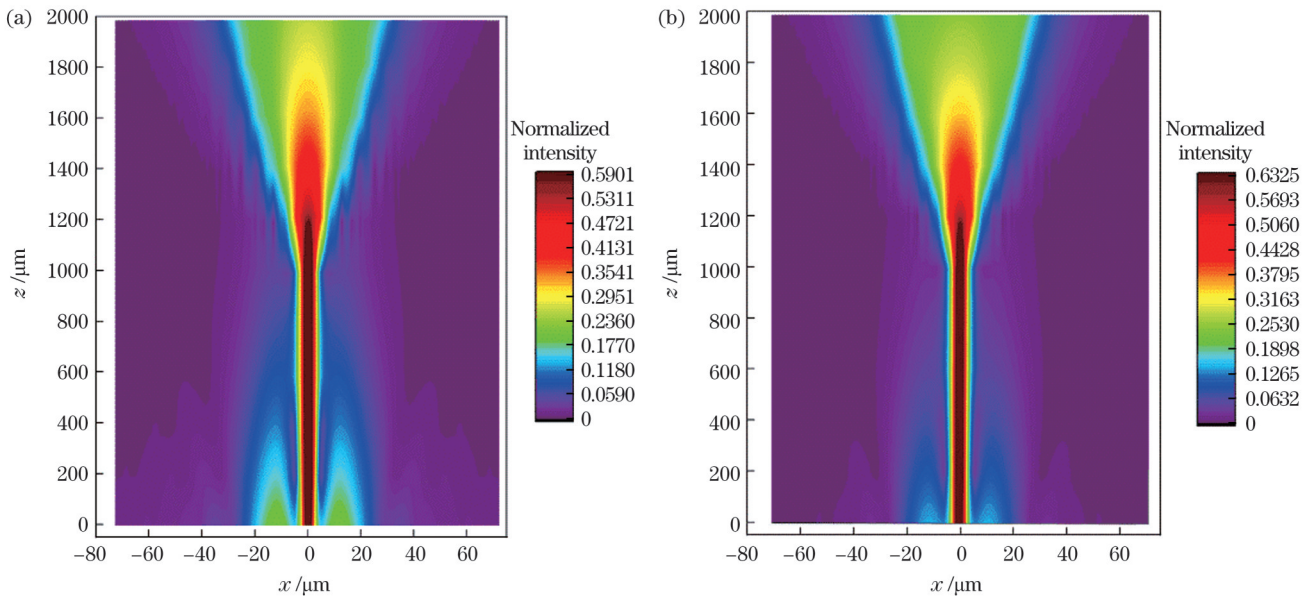


图 7 通过优化路径一得到的光场分布 ($R_f = 0.01\%$)。(a) $R_r = 90\%$; (b) $R_r = 10\%$

Fig. 7 Filed distributions obtained by optimized path 1 ($R_f = 0.01\%$). (a) $R_r = 90\%$; (b) $R_r = 10\%$

表 3 优化设计后的光束质量

Table 3 Beam quality after optimized design

$R_f / \%$	$R_r / \%$	Beam quality	Main feature
0.01	50.0	< 3.0	Weak optical pumping and filamentation
0.01	32.0	< 2.6	Weak optical pumping
0.01	1.0	< 1.8	Almost no nonlinear effect
0.10	32.0	< 3.2	Optical pumping and filamentation
0.10	0.1	< 1.8	Almost no nonlinear effect

另一种路径是将前后腔面的反射率都降至较低水平 ($R_r \leq 10\%, R_f \leq 0.1\%$),可以实现较高的光束质量。图 8 展示了该路径下两种优化设计的光场分布。图 8(a) 与图 7(b) 的后腔面相同 ($R_r = 10\%$),然而光束质量却更低,图 8(a) 的光场图中出现了大量旁瓣光,甚至在远离后腔面的区域仍有相当大的光强。类似的情况也出现

在后腔面反射率更高的锥形激光器中 ($R_r > 10\%$),推测是因为前腔面反射率提高后,剩余反射光与高反射的后腔面作用,形成较强的谐振效应,影响了腔内的光场分布。将后腔面反射率降至 1% 后,谐振效应被削弱,腔内的光场分布得到明显改善,如图 8(b) 所示。相比于优化路径一,在无法满足极低前腔面反射率 ($R_f = 0.01\%$) 的情况下,优化路径二需要将后腔面反射率大幅降低 ($R_r \leq 10\%$),这样才能得到高光束质量。

腔面反射率的改变同样意味着输出特性的变化,低反射率会造成阈值电流的升高和功率的降低。为了验证腔面反射的影响,除光束质量外还仿真了输出特性,结果如图 9 所示。图 9(a) 和图 9(b) 分别展示了上述 4 种优化设计的功率-电流-电压 (PIV) 曲线和光束质量因子-电流曲线。

图 9(a) 所示的 PIV 曲线显示,经化设计的器件阈值电流大幅增加 (I_{th} 从约 50 mA 增加至 300 mA),输出功率

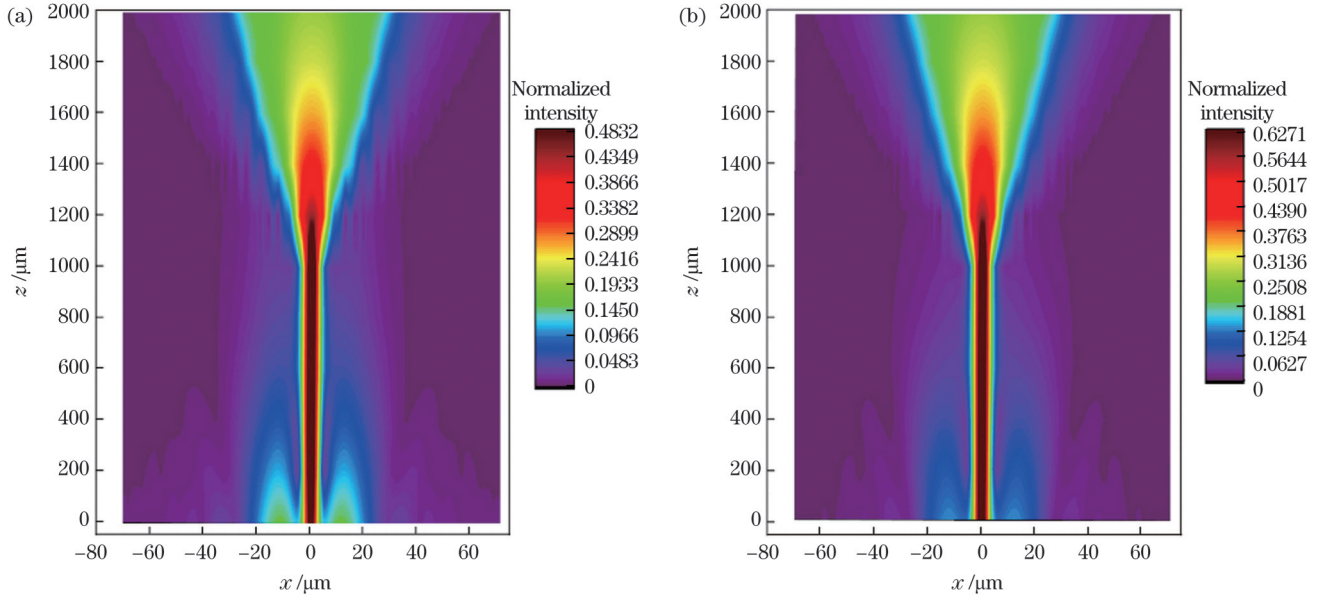


图 8 通过优化路径二得到的光场分布($R_t = 0.1\%$)。(a) $R_r = 10\%$; (b) $R_r = 1\%$

Fig. 8 Filed distributions obtained by optimized path 2 ($R_t = 0.1\%$). (a) $R_r = 10\%$; (b) $R_r = 1\%$

率有一定程度的损失,但功率依然能够达到 1200 mW 以上。这与锥形激光器特殊的结构和工作原理有关,不同于普通的半导体激光器,脊形部分输出的种子光功率通常不超过 100 mW,大部分增益在锥形部分完成,降低后腔面反射率对种子光功率的影响仅为毫瓦量级。此外,前腔面反射率的降低有助于提高锥形光放大器

的增益,补偿了后腔面反射率造成的损耗,这些为锥形激光器的腔面优化创造了条件。特别是图 9(b)中优化设计的 M^2 均低于传统锥形激光器,表明光束质量获得提高。特别是部分优化设计的 M^2 ($R_t = 0.01\%$ 、 $R_r = 10\%$ 和 $R_t = 0.10\%$ 、 $R_r = 1\%$),在高电流下依然保持在 2 以下,接近衍射极限,实现了高光束质量。

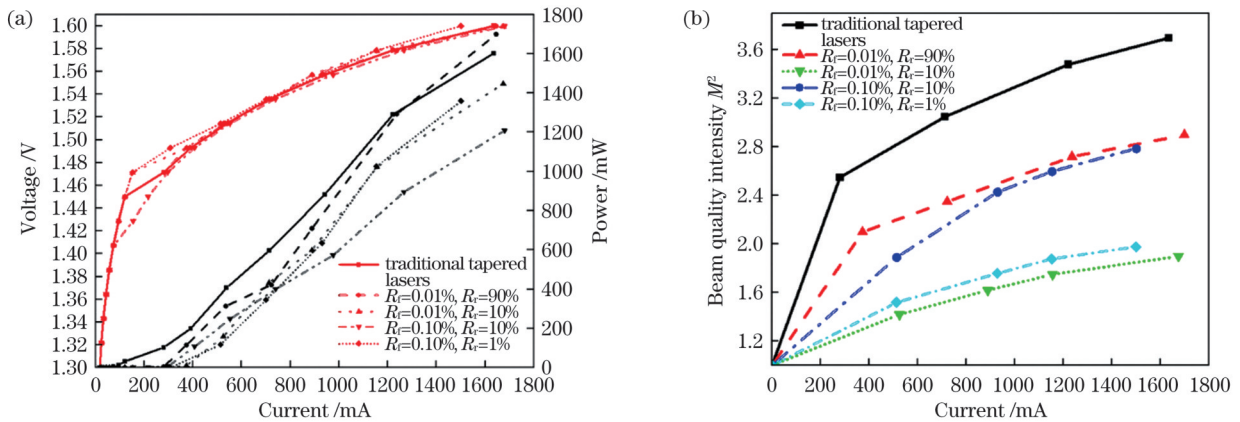


图 9 优化设计的锥形激光器的仿真结果。(a)PIV 曲线;(b)光束质量因子-电流曲线

Fig. 9 Simulation results for optimally designed tapered lasers. (a) PIV curves; (b) M^2 -current curves

尽管腔面反射率的优化造成了输出特性的损失,特别是阈值电流大幅增加,但是对于部分功率和光束质量要求较高的应用领域,同时满足瓦级功率和高光束质量的锥形激光器依然具有相当的吸引力,尤其是无需调整器件整体结构,与现有工艺相兼容。

4 结 论

研究了锥形激光器的腔面反射对光束质量的影响,基于腔面光学薄膜,建立了无抗反射结构的物理模型,通过改变前腔面和后腔面的反射率,采用锥形激光器的电光模型进行了仿真。结果表明,传统锥形激光

器中存在强烈的光泵、光束成丝、自聚焦和空间烧孔效应,使得高功率下的光束质量迅速恶化。腔面反射与上述非线性效应密切相关,来自腔面的剩余反射影响腔内的光场分布,造成局部增益和折射率的集中,并引发非线性效应,最终破坏器件的光束质量。研究发现:前腔面反射在此过程中起着关键作用,由于锥形激光器特殊的结构,前腔面的剩余反射光在锥形波导中传输,光场呈不均匀分布;后腔面反射直接引起光泵效应,对光束质量同样有较大影响。通过优化腔面反射率,提出两种优化路径,实现了高光束质量,部分优化设计的 M^2 低于 2。相比以往的方案,本方案无需改变

整体结构, 仅需利用光学薄膜调整腔面反射率, 即可获得瓦级的高输出功率和高光束质量, 为锥形激光器的设计提供了参考。

参 考 文 献

- [1] Nasim H, Jamil Y. Diode lasers: from laboratory to industry[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 56: 211-222.
- [2] 宁永强, 陈泳屹, 张俊, 等. 大功率半导体激光器发展及相关技术概述[J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0114001.
Ning Y Q, Chen Y Y, Zhang J, et al. Brief review of development and techniques for high power semiconductor lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0114001.
- [3] Yuan M Y, Wang W Q, Wang X Y, et al. Demonstration of an external cavity semiconductor mode-locked laser[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(19): 4855-4858.
- [4] Abbasi S P, Mahdih M H. Design of diode laser using slab coupled optical waveguide with graded refractive index structure[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 147: 107654.
- [5] Li X B, Li T, Shi B W, et al. The influence of substrate tilt angle on the morphology of laser cladding layer[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 391: 125706.
- [6] Sujecki S, Borrueel L, Wykes J, et al. Nonlinear properties of tapered laser cavities[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2003, 9(3): 823-834.
- [7] Li J, Qiu Y T, Cao Y H, et al. Numerical simulation of filamentation induced by waveguide in semiconductor taper amplifiers[J]. *Optik*, 2019, 176: 711-715.
- [8] Tijero J M G, Borrueel L, Vilera M, et al. Simulation and geometrical design of multi-section tapered semiconductor optical amplifiers at 1.57 μm [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9134: 91342A.
- [9] Fiebig C, Eppich B, Paschke K, et al. High-brightness 980-nm tapered laser: optimization of the laser rear facet[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(5): 341-343.
- [10] Sumpf B, Hasler K H, Adamiec P, et al. 1060 nm DBR tapered lasers with 12 W output power and a nearly diffraction limited beam quality[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7230: 275-282.
- [11] Müller A, Zink C, Ginolas A, et al. 10.5 W central lobe output power obtained with an efficient 1030 nm DBR tapered diode laser [C]//2017 IEEE High Power Diode Lasers and Systems Conference, October 11-12, 2017, Coventry, UK. New York: IEEE Press, 2017: 61-62.
- [12] Müller A, Zink C, Fricke J, et al. 1030 nm DBR tapered diode laser with up to 16 W of optical output power[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10123: 101231B.
- [13] Brox O, Bugge F, Ginolas A, et al. High-power ridge waveguide DFB and DFB-MOPA lasers at 1064 nm with a vertical farfield angle of 15°[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7616: 761610.
- [14] Patel S J, Jariwala A, Panchal C J, et al. Suppression of optical feedback in laser diodes using multilayered broad-band ultra-low reflective facets-coating[J]. *Journal of Nano and Electronic Physics*, 2020, 12(2): 020301.
- [15] 袁庆贺, 井红旗, 刘素平, 等. 导波模式对锥形半导体激光器输出特性的影响[J]. *中国激光*, 2021, 48(9): 0901001.
Yuan Q H, Jing H Q, Liu S P, et al. Influence of guided wave mode on output characteristics of tapered diode laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(9): 0901001.
- [16] Li J, Qiu Y T, Cao Y H, et al. Numerical simulation and experiment of high brightness tapered lasers[J]. *Optik*, 2018, 158: 502-507.
- [17] Esquivias I, Odriozola H, Tijero J M G, et al. Simulation of high brightness tapered lasers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7616: 76161E.
- [18] 曼玉选, 仲莉, 马骁宇, 等. 975 nm 分离电极锥形半导体激光器特性分析[J]. *中国激光*, 2021, 48(17): 1701005.
Man Y X, Zhong L, Ma X Y, et al. Characteristic analysis of 975 nm tapered semiconductor lasers with separated contacts[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(17): 1701005.
- [19] Levi A F J. *Essential semiconductor laser physics*[M]. San Rafael: Morgan & Claypool Publishers, 2018.
- [20] Patil D. *Semiconductor laser diode technology and applications*[M]. Croatia: InTech, 2012.
- [21] Siegman A E, Townsend S W. Output beam propagation and beam quality from a multimode stable-cavity laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1993, 29(4): 1212-1217.

Effect of Facet Reflection on Beam Quality of Tapered Laser

You Daoming^{1,2}, Tan Manqin^{1,2*}, Chen Wenbin^{1,2}, Liu Weihua^{1,2}

¹State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

²College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Objective Tapered lasers undergo severe beam quality deterioration under high powers. Optical pumping, self-focusing, spatial hole burning, and beam filamentation are some phenomena that occur in traditional tapered lasers, severely degrading the beam quality. Facet reflection causes these problems, but the specific influence mechanism of facet reflection on beam quality is unclear. This study aims to clarify the effect of facet reflection on the beam quality of tapered lasers and proposes an optimization scheme to improve the beam quality.

Methods Based on facet coating, this study establishes a physical model of a tapered laser without an antireflection structure. By varying the reflectivity of the front and rear facets and using the electro-optic model of the tapered lasers for simulations, the optical field distributions at different positions in the transmission direction in the facet are analyzed. In

addition, the effect of facet reflection on the beam quality of the tapered laser is investigated. The output characteristics and beam quality factor of the optimized design are also verified using the simulation method.

Results and Discussions In traditional tapered lasers, phenomena such as optical pumping, spatial hole burning, and beam filamentation cause the beam quality to deteriorate rapidly under high powers (Fig. 3). The residual reflected light on the front facet is transmitted in the tapered waveguide, and the optical field exhibits a significantly uneven distribution. With a decrease in the reflectivity of the front facet, the side lobes are suppressed. When the reflectivity of the front facet decreases below 1%, the light-field distribution tends to be stable. In particular, when the reflectivity of the front facet is 0.01%, the beam intensity in waveguide increases significantly (Fig. 4). The reflectivity of the rear facet directly induces an optical pumping effect. Reducing the reflectivity of the rear facet can weaken the optical pumping in the cavity (Fig. 5). Combined with the optimization of the front facet reflection, the mode characteristics are significantly improved, and an output close to the fundamental mode is obtained (Fig. 6). By optimizing the reflectivity of the facet, two optimization paths are proposed to achieve high beam quality (Figs. 7 and 8). Four optimized designs are selected to simulate the output characteristics. Compared with the traditional tapered lasers, the output characteristics are not significantly reduced, whereas the simulation of beam quality shows that the optimized design achieves a high beam quality with beam quality factor M^2 even lower than 2 (Fig. 9).

Conclusions Facet reflection is closely related to the beam quality. The residual reflection from the facets influences the field distribution in the cavity, causing the concentration of the local gain and refractive index, giving rise to nonlinear effects, and finally deteriorating the beam quality of the device. The reflection of the front facet plays a critical role in this process. The residual reflected light of the front facet is transmitted through a tapered waveguide owing to the unique structure of the tapered laser, and the optical field generates a significantly uneven distribution. In addition, the reflection of the rear facet directly causes optical pumping, which also significantly impacts the beam quality. By optimizing the reflectivity of the facet, two optimized paths are proposed to achieve high beam quality. Some optimal designs have their beam quality factor M^2 less than 2 and maintain good output characteristics. Compared to previously designed schemes, there is no need to modify the overall structure. Adjusting only the reflectivity of the facet using the optical film can yield high beam quality. This study provides a reference for the design of a tapered laser.

Key words lasers; tapered lasers; facet reflection; optical thin film; beam quality