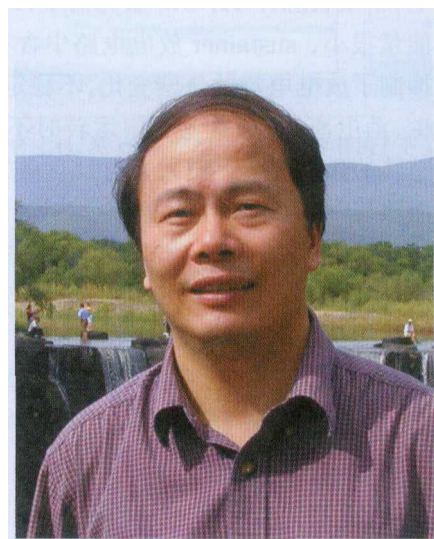


平面工艺制作的定向输出微腔半导体激光器

光学微腔中偶极子自发辐射受到空间和频谱调制,能实现自发辐射增强或抑制效应,而且其有源区体积可以非常小,有利于极低阈值工作和极高的调制速率。在过去的二十多年来,垂直腔面发射激光器、回音壁模式(*whispering-gallery mode*)微腔激光器以及光子晶体微腔激光器三类光学微腔激光器的研究取得了很大的进展。回音壁模式微腔中,模式光线由于其在微腔界面的入射角大于全反射临界角而受到限制,是一种结构非常简单的光学微腔。微盘激光器作为典型的回音壁模式微腔激光器,可利用普通的边发射激光器外延片材料,采用半导体平面工艺制作,引起了人们很大的重视。但圆对称结构的微盘激光器易于实现回音壁模式的全反射限制,却难以得到定向的激光输出,限制了它的应用。人们往往采用局部破坏圆盘的对称性、整体变形以及消逝波耦合的输出波导实现微盘激光器的定向激光输出。在圆对称的微盘结构中,模式光线在微腔与空气界面上的入射角是恒定的,而在整体变形的圆盘中,如椭圆形微腔中,模式光线在界面的入射角则不断变化,并在某些位置上小于全反射临界角而折射出光学微腔,从而实现定向输出。这种变形微盘中模式光线往往具有混沌现象,因而吸引了人们的注意。

类似于微盘结构,正三角形^[1]、正方形^[2]、长方形^[3]、六边形^[4]等多边形光学微腔也具有全反射限制的高Q值回音壁模式。把正三角形中折叠传播的模式光线拉直,可以发现正三角形腔等效于一个变形F-P谐振腔,这样正三角形中的模式就可以用横模数和纵模数来标记。图1所示是折射率为3.2边长为4 μm的正三角形谐振腔中横磁场的基横模 $TM_{0,15}$ 、一阶横模 $TM_{1,15}$ 和二阶横模 $TM_{2,15}$ 的反对称态的电场分布图。图2为折射率为3.2边长为2.5 μm的正方形谐振腔中 $TM_{6,8}$ 、 $TM_{5,9}$ 和 $TM_{4,10}$ 的场分布,这三个模分别对应基横模,一阶横模,二阶横模,模阶数代表模式场分布在正方形两个边上的节点数。在对称的圆形微腔中,圆周对应的是纵模的场分布,而横模场分布对应是径向的光场分布,这样在圆周上场分布的包络是均匀分布的。而在正三角形和正方形光学微腔中,谐振腔边界上的场分布同时受到纵模和横模场分布的调制,边界上场分布的包络曲线往往体现出横模场分布的特性。这样在模式场分布较弱的区域联接一输出波导,就有可能在保持高Q值的受限模式的同时获得微腔激光器的定向输出。



黄永箴 教授

杨跃德 车凯军 王世江

杜云

中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点联合实验室, 北京 100083

E-Mail: yzhuang@red.semi.ac.cn

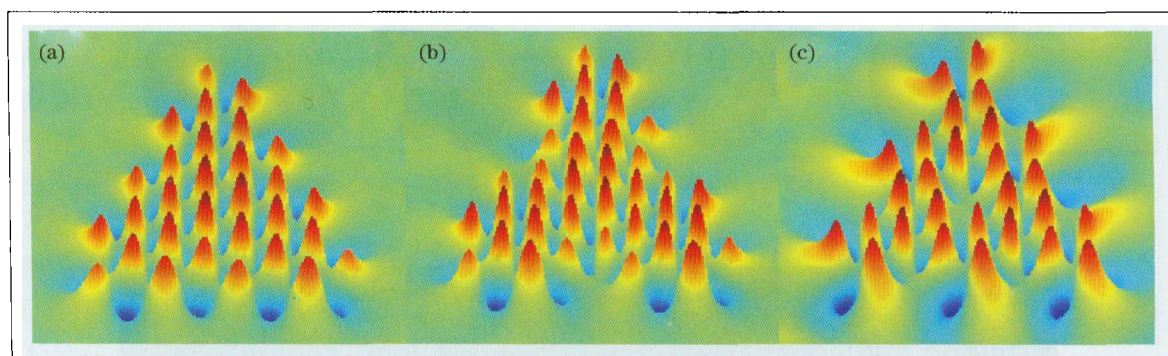


图1 边长4 μm的三角形中受限模式。(a) $TM_{0,15}$; (b) $TM_{1,15}$; (c) $TM_{2,15}$ 的电场分布

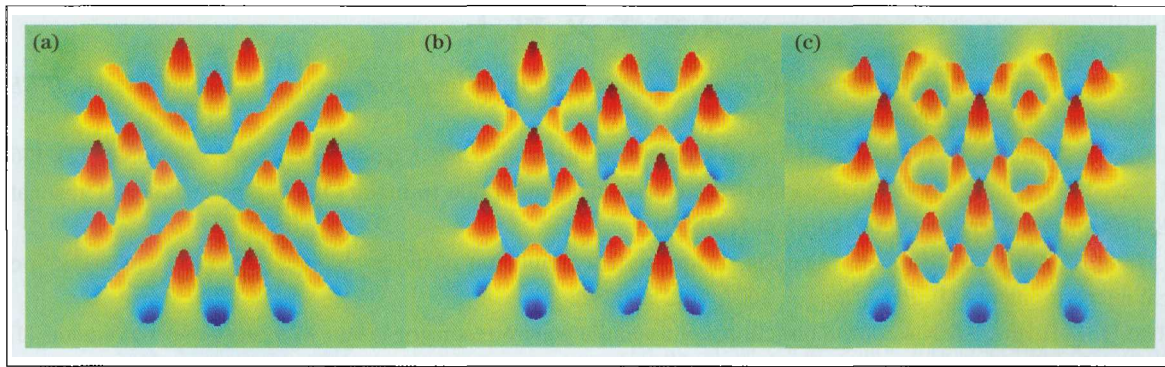


图 2 边长 $2.5 \mu\text{m}$ 的正方形中受限模式。(a) $\text{TM}_{6,8}$; (b) $\text{TM}_{5,9}$; (c) $\text{TM}_{4,10}$ 的电场分布

通过时域有限差分数值模拟分析,我们发现在正方形光学微腔某一边的中点连接一输出波导,一阶横模的 Q 值降低较小,而且可高效地从输出波导耦合输出,而基横模的 Q 值则大幅度减少^[6]。图 3 所示为模拟得到的带输出波导的边长 $2.5 \mu\text{m}$ 正方形谐振腔中 $\text{TM}_{6,8}$ 和 $\text{TM}_{4,8}$ 的电场分布,其中 $0.2 \mu\text{m}$ 宽的输出波导直接联接到正方形右边的中点。图 3(b) 右边距离正方形边大于 $1 \mu\text{m}$ 处的场分布放大了 4 倍,以清楚地显示耦合进入输出波导的场分布。正方形边上中点对应基横模 $\text{TM}_{6,8}$ 场分布的极大值,结果与输出波导耦合过强,模式 Q 值很小;而一阶横模 $\text{TM}_{4,8}$ 的模场分布在中点是一个很弱的峰值,在耦合输出的同时模式 Q 值还很高,有利于实现低阈值的微腔激光器。对边长为 $20 \mu\text{m}$ 的正方形光学微腔,当中心点处的输出波导宽度达到 $2 \mu\text{m}$,模拟得到的波长在 1550 nm 附近模式的最高 Q 值还可大于 10^4 。对于正三角形光学微腔,则可选择在三角形的顶点引入输出波导以实现定向输出正三角形微腔激光器^[6]。

利用普通边发射半导体激光器的外延片,我们采用普通光刻及感应耦合等离子刻蚀技术研制出定向输出正三角形和正方形 InGaAsP/InP 微腔激光器^[7,8]。实现了边长为 $10\sim 30 \mu\text{m}$ 的正三角形 InGaAsP/InP 微腔

激光器室温电注入连续激射,最高连续激射温度为 310 K ;而边长 $20 \mu\text{m}$ 的正方形 InGaAsP/InP 微腔激光器最高电注入连续激射温度为 305 K ,边模抑制比达到 30 dB 。目前所研制激光器的输出波导宽度是 $2 \mu\text{m}$,进一步减小器件尺寸及输出波导宽度,将能实现单模性更好的定向输出微腔激光器。最近,我们在实验上观测到正三角形微腔激光器双模竞争导致的光双稳现象,并利用考虑了非对称的非线性增益及对称和反对称模不同耦合输出效率的速率方程解释这一现象。

为了研制性能更优的微米量级的微腔半导体激光器,我们还利用时域有限差分数值模拟方法深入研究了三维微腔的模式特性,特别是不同偏振模式的 Q 因子^[9,10]。我们发现在垂直方向为半导体波导的圆柱形光学微腔中, TM 偏振的回音壁模式的纵向辐射损耗基本为零,而 TE 偏振的回音壁模式只在圆柱半径大于 $5\sim 6 \mu\text{m}$ 后纵向辐射损耗才接近为零。因此传统的微盘激光器利用 TE 模就必须在垂直方向有大折射率差形成的强波导,但利用 TM 模则可以研制出结构简单的微米量级电注入圆柱形半导体激光器。

该项工作得到了国家自然科学基金(60777028, 60723002 和 60838003) 以及国家重大基础研究项目(2006CB302804)的资助。

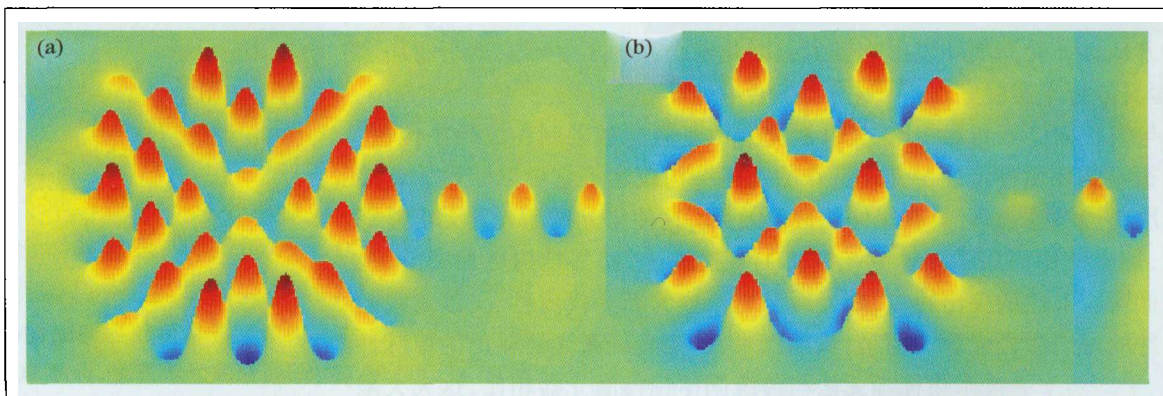


图 3 带输出波导的边长 $2.5 \mu\text{m}$ 正方形中受限模式。(a) $\text{TM}_{6,8}$; (b) $\text{TM}_{4,8}$ 的电场分布

— | 参 考 文 献 | —

- 1 Y. Z. Huang, Q. Chen, W. H. Guo *et al.*. Mode characteristics for equilateral-triangle optical resonators [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2006, **12**(1): 59~65
- 2 W. H. Guo, Y. Z. Huang, Q. Y. Lu *et al.*. Modes in square resonators [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(12): 1563~1566
- 3 Y. D. Yang, Y. Z. Huang. Mode analysis and Q-factor enhancement due to mode coupling in rectangular resonators [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2007, **43**(6): 497~502
- 4 Y. D. Yang, Y. Z. Huang. Symmetry analysis and numerical simulation of mode characteristics for equilateral-polygonal optical microresonators [J]. *Phys. Rev. A*, 2007, **76**(2): 023822
- 5 W. Zhao, Y. Z. Huang. Analysis of the directional emission in square resonator lasers with an output waveguide [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(8): 463~465
- 6 Y. Z. Huang, W. H. Guo, Q. M. Wang. Influence of output waveguide on mode quality factor in semiconductor microlasers with an equilateral triangle resonator[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(22): 3511~3513
- 7 Y. Z. Huang, Y. H. Hu, Q. Chen *et al.*. Room-temperature continuous-wave electrically injected InP-GaInAsP equilateral-triangle-resonator lasers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(13): 963~965
- 8 Y. Z. Huang, K. J. Che, Y. D. Yang *et al.*. Directional emission InP/InGaAsP square-resonator microlasers [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(19): 2170~2172
- 9 Y. D. Yang, Y. Z. Huang, Q. Chen. High-Q TM whispering-gallery modes in three-dimensional microcylinders [J]. *Phys. Rev. A*, 2007, **75**(1): 013817
- 10 Y. Z. Huang, Y. D. Yang. Mode coupling and vertical radiation loss for whispering-gallery modes in 3D microcavities[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(9-12): 1411~1416

新一代大功率光子晶体光纤飞秒激光器

以染料激光为代表的第一代飞秒激光始于1981年,使人类第一次在微观世界中进入到飞秒时代。但是,由于染料激光器输出功率较低和运转的不稳定性,使得超快领域的研究受到极大限制。1991年,以掺钛蓝宝石固体激光器为代表的第二代飞秒激光诞生,它所具有的材料稳定性和运转的可靠性,使染料飞秒激光器濒于淘汰。特别是在超强方面,通过啁啾脉冲放大技术使脉冲峰值功率已达到了数百太瓦(10^{14} W)乃至拍瓦(10^{15} W)水平,这是前所未有的极端高峰值功率,从而使飞秒激光在强场物理、化学反应动力学等基础学科和激光受控核聚变、第四代光源、新型激光加速器、飞秒激光微纳加工等大的科学工程和高新技术中获得崭新的应用。但是,高功率钛宝石飞秒激光系统的多重转换环节,使其成本昂贵;另一方面,钛宝石飞秒高能激光系统是由数百个分离的机械零件、光学零件组成,其光束传输的开放性,受周围环境影响极大,因此整个系统不得不安置于超净、防震、恒温的特定实验室。

与块状固体激光器相比,光纤激光器由于激光被限制在波导中传输,具有很好的环境稳定性。光纤特殊的几何结构决定了它可以获得非常高的单次通过增益;而且具有极好的散热效果。这使得光纤激光器无需冷却系统,加上使用商用半导体激光器(LD)直接抽运,使其结构更加紧凑,成本更低廉。上述的突出特点,使光纤激光器成为新一代皮秒、飞秒量级超短脉冲的理想激光光源。但是,长期以来,锁模光纤激光器输出的单脉冲能量、平均功率等技术指标却无法与传统固体锁模激光器相比,这大大限制了该类激光器在工业和科研中诸多领域的应用范围。因此,从光纤激光



柴路教授

胡明列 栗岩锋 邢歧荣

王清月

天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室,天津 300072

E-Mail: lu_chai@tju.edu.cn