

·激光技术·

量子级联激光器光束质量分析及测量

蔡 军, 李森森

(光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308)

摘 要:量子级联激光器具有体积小、重量轻、电光转换效率高及可直接调制等特点,目前逐渐在诸多领域开展应用。单管量子级联激光器输出激光近似为高斯光束,利用高斯光束传输规律,理论分析了激光光束质量的评价方法。实验测量了单管量子级联激光器的输出激光近场和远场的光斑分布,计算了输出激光发散角,并利用 M^2 因子评价了输出激光光束质量。

关键词:中红外激光;量子级联激光器;光束质量

中图分类号:TN248.4

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2018)-03-0013-04

Analysis and Measurement of Beam Quality of Quantum Cascade Laser

CAI Jun, LI Sen-sen

(Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Tianjin 300308, China)

Abstract: Quantum cascade laser (QCL) has been used in many fields for its characters of small size, small weight, high efficiency and direct modulation. The output laser beam of the QCL is nearly to be Gaussian style. The evaluating method of the laser beam quality is analyzed in theory based on the Gaussian beam transmission law. And the output near field and far field of the single quantum cascade laser is measured in the experiment. The output divergence angle is calculated and the output beam quality is analyzed by using the M^2 factor.

Key words: mid-infrared laser; quantum cascade laser (QCL); beam quality

1994年,美国贝尔实验室发明的量子级联激光器^[1](quantum cascade laser, QCL)开创了具有基础性、战略性和前瞻性的半导体激光前沿领域。量子级联激光器具有电光效率高、体积重量小、可室温运行、波长覆盖范围广、波长可调谐及脉冲可直接调制的特点^[2-6]。量子级联激光器的产生以带结构工程学和共振隧穿的发展为基础,其核心结构半导体异质结构由分子束外延技术生长。量子级联激光器是子带间跃迁激光器,其工作原理与传统二极管激光器的工作原理有本质不同,使其激光波长可覆盖大部分中红外和部分远红外光谱区域。近年来,在痕量气体检测、大气监控、自由空间激光通信和光电对抗等领域得到了应用和广泛关注。量子

级联激光器能够覆盖中红外波段,未来将成为极具竞争力的中红外激光光源^[7]。

在实际应用中,除了追求量子级联激光器的功率提升之外,光束质量的提高也非常有必要。从材料上来说,量子级联激光器属于半导体激光家族中的一员。量子级联激光器又具有自身独特的地方,尤其是在光束质量方面。量子级联激光器的窄基结构较好控制了输出激光像散,使输出激光XY方向的光束质量比较对称,理论上接近单模分布^[8-9]。利用高斯光束传输理论,分析了单管量子级联激光器的输出激光光束质量。实验上,利用二维光束质量分析仪测量了输出激光近场和远场分布,计算了输出激光发散角,并利用 M^2 因子评价了输出激光光束质量。

收稿日期:2018-03-16

作者简介:蔡军(1975-),女,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为中红外激光器及其应用技术;李森森(1987-),男,博士研究生,工程师,主要研究方向为高功率激光系统光束整形技术和中红外激光技术。

1 原理

半导体激光器的出光腔面通常只有微米量级,发射激光会出现很强的衍射现象,直接发出光束具有很大的发散角,一般全角为 $15^\circ\sim 70^\circ$;同时因为半导体激光器芯片的横向与侧向波导尺寸不同,所以横模和侧模束腰的纵向位置不同,即具有一定的像散。因此,要对半导体激光器的直接发射光束进行准直,才能在后端光路中使用。与普通半导体激光器相比,量子级联激光器条宽比较窄。一般量子级联激光器单管器件在快轴方向(即材料外延生长方向)具有基模光场,光束质量较好;在慢轴方向(即垂直于材料外延生长方向)可能含有高阶空间模式光场,导致慢轴方向的光斑尺寸与发散角相对于基模光场同时放大,光束质量下降,所以量子级联激光器单管器件的快慢轴光束质量具有一定的不均匀性。考虑到量子级联激光器芯片为窄基结构,理论上像散的效应相对较小,输出激光在 XY 方向近似为高斯分布。理想高斯光束传输规律如下

$$d^2(z) = d_0^2 \left[1 + \frac{(z - z_0)^2}{z_R^2} \right] \quad (1)$$

其中, d_0 为激光光斑束腰直径; z_0 为光斑束腰位置; z_R 是瑞利长度。在自由空间传输过程中,高斯光束满足二次曲线的规律。通过测量激光束在空间传输时不同位置 z 处的光斑分布计算出光斑直径 $d_x(z)$ 和 $d_y(z)$,并根据测量结果进行如下二次曲线拟合

$$d_x^2(z) = A_1 + B_1 z + C_1 z^2 \quad (2)$$

$$d_y^2(z) = A_2 + B_2 z + C_2 z^2 \quad (3)$$

可求出光束在 XY 方向上的束腰直径、发散角和束腰位置。其中两个方向上的束腰直径为

$$d_{0x} = \sqrt{A_1 - \frac{B_1^2}{4C_1}}; d_{0y} = \sqrt{A_2 - \frac{B_2^2}{4C_2}} \quad (4)$$

两个方向上的远场发散角为

$$\theta_x = \sqrt{C_1}; \theta_y = \sqrt{C_2} \quad (5)$$

两个方向上的束腰位置为

$$z_{0x} = -\frac{B_1}{2C_1}; z_{0y} = -\frac{B_2}{2C_2} \quad (6)$$

激光的束腰宽度与发散角都可以通过光学系统来改变,但对确定的光束,其束腰宽度与发散角的乘积是一常数,定义为光束参数积(beam parameter product, BPP),即为

$$BPP = d_0 \theta \quad (7)$$

对于基模高斯光束, $BPP=4\lambda/\pi$;对于实际光束 $BPP > 4\lambda/\pi$ 。BPP值越大光束质量越差;任意光束的光束参数积与理想高斯光束的光束参数积的比值为该光束的 M^2 因子

$$M^2 = \frac{\lambda}{4\pi} d_0 \theta \quad (8)$$

对 M^2 的测试原理示意图如图1所示。

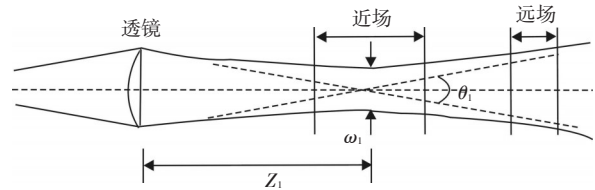


图1 M^2 测试原理示意图

激光经平凸透镜后聚焦为“人工”束腰。经过聚焦透镜后的激光光束传输和不聚焦的实际激光传输有一定关系。透镜后的光束传播也可以由上式描述。用脚标1表示经过透镜后的光束。 z 表示测量点到透镜的距离。

M^2 因子评价光束质量的方法已经成为一种最为广泛和被大家所接受的光束质量参数。对于光束分布为旋转对称的激光束,其 M^2 因子在 XY 方向是相等的。对于半导体激光器具有严重像散、分布不对称的激光束,其 M^2 因子在 XY 方向上差别很大。量子级联激光器作为半导体激光家族中的一员,具有独特的地方,其芯片条宽较窄,约 $10\ \mu\text{m}$ 量级,厚度为 $1\ \mu\text{m}$ 量级,其像散不严重, XY 方向的 M^2 因子差不显著。

2 实验结果与讨论

实验中,量子级联激光器的工作温度约 $20\ ^\circ\text{C}$,输出激光波段中红外激光波段。在稳定功率输出条件下,二维光束质量分析仪测量输出激光近场和远场光斑分布,计算远场发散角和 M^2 因子。图2给出了测量量子级联激光器近场和远场光斑测试示意图。

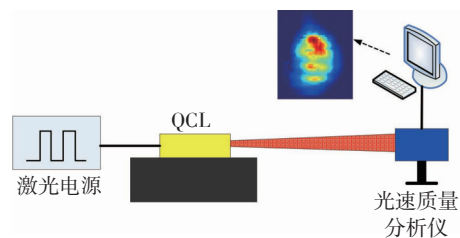


图2 QCL光束质量测试实验布局示意图

实验中,将QCL固定在平台上,将二维光束质量分析仪固定在滑轨上,激光器的供电电源为脉冲电源,二维光束质量分析仪型号为PYIII,前后移动光束质量分析仪,在不同距离上测量QCL的输出激光光斑参数。

实验测量了QCL出口不同位置的近场光斑分布。距离从100~800 mm,输出激光光斑分布如图3所示。

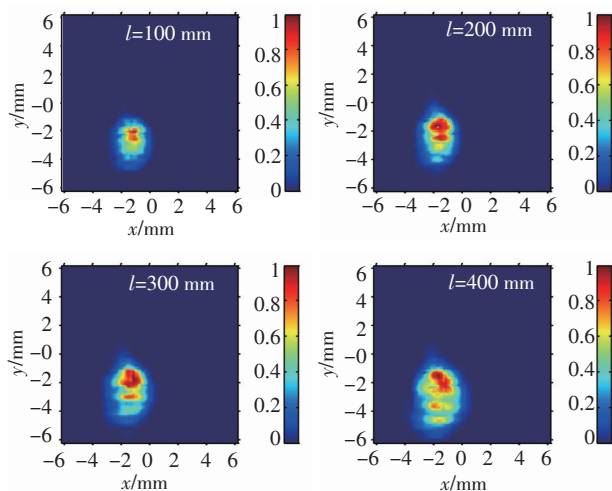


图3 QCL传输不同距离的近场光斑分布

整体上看,随着传输距离的增加,输出光斑越来越大,整体发散比较明显。且光斑成椭圆形,横向(X)和纵向(Y)的尺寸不一致。由于量子级联激光器芯片在快轴方向和慢轴方向不一致,导致 XY 方向激光光束质量不同,具有一定的像散,所以量子级联激光器单管器件的 XY 方向上具有一定的不均匀性。

XY 方向的线灰度分布如图4所示。

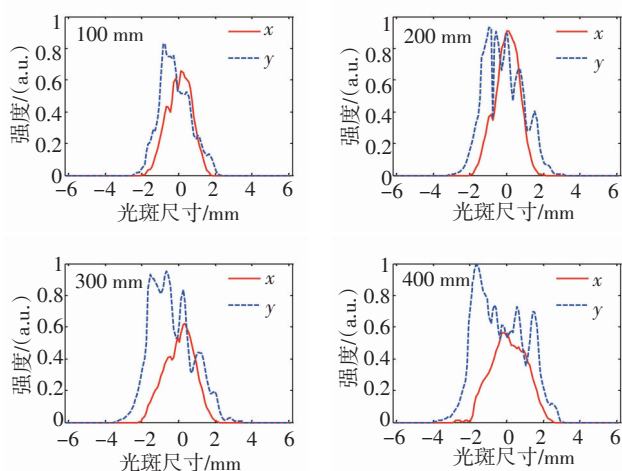


图4 QCL传输不同距离的光斑线灰度分布

近场光斑尺寸随着传输距离的增加越来越大,说明QCL输出激光本身具有一定的发散性。根据输出激光光斑尺寸的变化,粗略估计, X 方向发散角为4 mrad, Y 方向发散角为6 mrad。

利用透镜聚焦后,观察输出激光光斑分布。选取最小焦距位置,输出激光远场光斑如图5所示。

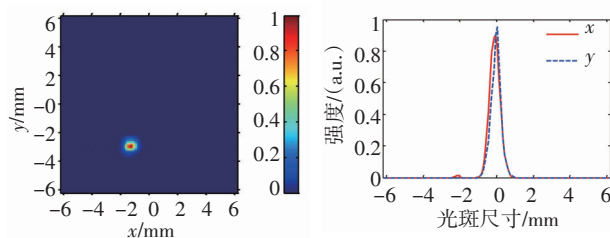


图5 QCL输出激光远场光斑分布

从远场上看,焦斑接近圆形,整体对称性较好,焦斑尺寸1.28 mm,焦斑距离透镜的距离为310 mm,计算得其远场发散角约为4.13 mrad。

根据不同位置的输出激光光斑尺寸,利用双曲拟合,在 Y 方向拟合束腰尺寸1.13 mm,位置是距离透镜328 mm,其远场发散角为6.25 mrad。计算其纵向(Y 方向)的 M^2 因子为1.21,如图6所示。

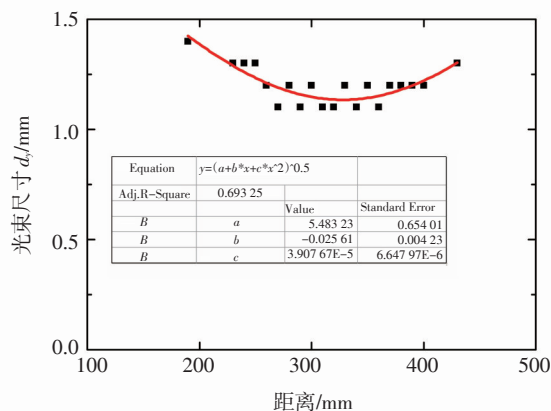


图6 纵向方向光斑拟合结果

3 结论

介绍了高斯光束传输理论,分析了单管量子级联激光器的输出激光光束质量的评价方法。利用二维光束质量分析仪测量了输出激光近场和远场分布。实验结果表明,单管量子级联激光器近场 XY 方向为椭圆分布,两个方向的输出激光发散角分别为4 mrad和6 mrad;远场焦斑分布均匀,计算得其纵

向的 M^2 因子为1.21。

参考文献

- [1] Faist J, Capasso F, Sivco D L, et al. Quantum cascade laser[J]. Science, 1994, 264: 553-556.
- [2] Mujagic E, Schwarzer C, Yao Y, et al. Two-dimensional broadband distributed-feedback quantum cascade laser arrays[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(14): 141101.
- [3] Miriam Serena Vitiello, Giacomo Scalari, Benjamin Williams, et al. Quantum cascade lasers: 20 years of challenges[J]. Optics Express, 2015, 23(4): 5167-5182.
- [4] Bloom G, Larat C, Lallier E, et al. Passive coherent beam combining of quantum-cascade lasers with a Damman grating[J]. Optics Letters, 2012, 36(19): 3810-3812.
- [5] Chann B, Huang R K, Missaggia L J, et al. Near-diffraction-limited diode laser arrays by wavelength beam com-

binning[J]. Optics Letters, 30(16): 2104-2106.

- [6] Alfredo Bismuto, Stephane Blaser, Romain. High performance, low dissipation quantum cascade lasers across the mid-IR range[J]. Optics Express, 2015, 23(5): 5477-5484.
- [7] Andrew Sijan. Development of military lasers for optical countermeasures in the Mid-IR[J]. Proc of SPIE, 2009, 7483: 748304.
- [8] Arbabi Amir, Ryan M Briggs, Horie Yu, et al. Efficient dielectric metasurface collimating lenses for mid-infrared quantum cascade lasers[J]. Optics Express, 2015, 23(26): 33310-33317.
- [9] YU Nan-fang, Laurent Diehl, Ertugrul Cubukcu, et al. Near-field imaging of quantum cascade laser transverse modes[J]. Optics Express, 2007, 15(20): 13227-13235.
- [10] 曹丹丹, 谭中伟. 基于虚像相位阵列的锯齿形滤波器研究[J]. 光电技术应用, 2018, 33(1): 10-15.

(上接第12页)

合车辆辅助驾驶系统使用的非球面鱼眼镜头。对整个车辆辅助驾驶系统的设计进行了深入的研究。根据车辆辅助驾驶系统镜头使用要求确定了鱼眼镜头的设计参数和光学材料,构建了该镜头的初始结构,再通过对镜头的像差校正对其进行优化,得到优化后的镜头结构与参数。由于镜头设计采用了非球面设计不但能减少镜片使用数量,而且简化了镜头的结构,可以在保证成像质量的前提下降低镜头的成本。整个光学系统的结构非常简单、镜头体积小且系统成像质量比较好。针对鱼眼透镜成像时产生严重的畸变的问题,结合整个系统的需求进一步研究了系统的鱼眼镜头畸变校正算法,构建出一种有效适用于车辆辅助驾驶系统的鱼眼镜头畸变校正算法。通过该算法可以将鱼眼镜头拍摄的畸变图像校正为无畸变图像,便于车辆辅助驾驶系统适用。集成到车辆辅助驾驶全景显示系统中,通过对多个镜头采集的图像进行合成并进行了实际应用验证,结果表明系统应用良好。

参考文献

- [1] 敖谷昌, 杨利. 机动车驾驶员人为因素与交通事故危害

性关联分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(1): 1-3.

- [2] 李淑庆, 彭囿朗, 肖莉英, 等. 道路交通事故发生机理研究现状与趋势分析[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(3): 14-19.
- [3] 吕婷婷, 钱勇生, 曾俊伟. 中国和美国道路交通事故数据对比研究[J]. 城市道桥与防洪, 2015, 10: 61.
- [4] 袁佑新, 吴妍, 刘苏敏, 等. 可视汽车倒车雷达预警系统设计[J]. 汽车电子, 2012, 23(2): 268-270.
- [5] 烁华, 冯桑, 康迂福. 倒车辅助系统的技术的发展[J]. 汽车与配件, 2010, 42: 40-43.
- [6] 葛晓宇, 刘恒. 倒车辅助系统研究分析[J]. 轻型汽车技术, 2012(4): 26-19.
- [7] 刘铁军. 汽车全方位视觉传感器倒车辅助装置的设计[J]. 电工技术理论与实践, 2015(7): 79.
- [8] 朱利娜. 基于单片机的超声测距倒车雷达的研究[J]. 单片机开发与应用, 2011, 23(8): 110-113.
- [9] 李雁斌. 基于全方位视觉的车载嵌入式航标跟踪系统[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [10] 丁鑫. 全景视觉泊车辅助系统研究[D]. 杭州: 浙江大学信息与电子工程学系, 2010.