

文章编号: 0258-7025(2007)05-0641-05

980 nm 高功率 VCSEL 的光束质量

李 特^{1,2}, 宁永强¹, 孙艳芳^{1,2}, 崔锦江^{1,2}, 郝二娟^{2,3},
秦 莉¹, 套格套^{1,2}, 刘 云¹, 王立军¹, 崔大复⁴, 许祖彦⁴

¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激发态物理重点实验室, 吉林 长春 130033
² 中国科学院研究生院, 北京 100039
³ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033
⁴ 中国科学院物理研究所, 北京 100080

摘要 利用 CCD 成像技术, 设计出一种简单的测量垂直腔面发射激光器(VCSEL)的光束质量因子 M^2 的方法。在注入电流分别为 900 mA, 1500 mA, 3000 mA 和 6000 mA 时, 对出光孔径 300 μm , 激射波长为 980 nm 的垂直腔底面发射激光器的束腰等光束参数进行了测量, 并应用激光光束传播的高斯方程拟合求得了 M^2 因子的值分别为 66, 58, 44 和 53。另外, 当注入电流为 900 mA 和 3000 mA 时, 对器件的远场分布进行了分析并测得了器件的远场发散角, 测量值与理论计算值吻合较好。

关键词 激光器; 垂直腔面发射激光器; 光束质量因子; 远场发散角; 注入电流; 高功率

中图分类号 TN 248.4 **文献标识码** A

Beam Quality of 980 nm High Power Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser

LI Te^{1,2}, NING Yong-qiang¹, SUN Yan-fang^{1,2}, CUI Jin-jiang^{1,2}, HAO Er-juan^{2,3},
QIN Li^{1,2}, TAO Ge-tao¹, LIU Yun¹, WANG Li-jun¹, CUI Da-fu⁴, XU Zu-yuan⁴

¹ Key Laboratory of Excited State Processes, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China
³ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
The Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
⁴ Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

Abstract A simple method to measure the beam quality factor (M^2) of high-power vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) was designed by employing the charge coupled device (CCD) technology. When the injection currents were 900 mA, 1500 mA, 3000 mA and 6000 mA, respectively, the waists of a 980 nm bottom-emitting VCSEL with a 300 μm aperture were measured and the values of M^2 were 66, 58, 44 and 53, respectively, which were calculated by Gauss fitting. In addition, far-field pattern was analyzed as the injection currents were 900 mA and 3000 mA. At the same time, far-field angles were measured and the values of them were in good agreement with the calculated value exactly.

Key words lasers; vertical-cavity surface-emitting laser; beam quality factor; far-field angles; injection current; high power

收稿日期: 2006-10-18; 收到修改稿日期: 2006-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(60636020, 60676034, 60476029, 60577003)资助项目。

作者简介: 李 特(1981—), 男, 吉林省梅河口市人, 博士研究生, 研究方向为半导体光电子器件。

E-mail: lite810622@yahoo.com.cn

导师简介: 宁永强(1965—), 男, 研究员, 博士生导师, 目前研究方向为新型半导体激光器及其相关物理。

E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn

1 引 言

垂直腔面发射激光器^[1] (VCSEL) 作为一种新型的半导体激光器, 由于阈值电流小、易实现动态单模工作、易于二维集成等优点正在受到越来越多的关注。随着垂直腔面发射激光器制作工艺水平的提高和新型结构的出现, 功率在 1 W 以上的大功率垂直腔面发射激光器单元已经实现^[2~4]。这些大功率垂直腔面发射激光器具有体积小、重量轻、输出功率高和散热方式简单等优点, 使其在抽运固体激光器^[5] 和光纤激光器、激光显示、自由空间光通信、材料加工以及激光武器等方面的应用越来越广泛。但大功率垂直腔面发射激光器所采用的增大出光孔径的方法在提高了输出功率的同时也造成了光束质量的变差。2005 年德国 Ulm 大学报道了直径为 134 μm 的垂直腔面发射激光器的 M^2 达到了 57.8^[6]。美国 Novalux 公司通过扩展外腔的方法来提高大功率垂直腔面发射激光器的光束质量, 2003 年他们报道了直径 100 μm 的扩展外腔垂直腔面发射激光器在输出功率为 1 W 时, M^2 只有 3~5。但这种结构较传统的垂直腔面发射激光器复杂, 不利于大面积集成。因而近几年在国内外, 研究和制造高光束质量的大功率垂直腔面发射激光器已经成为新的研究热点^[7~9]。

目前, 许多商品化的测量仪器已经用于激光器的光束质量测量, 但由于垂直腔面发射激光器特殊的光束特性和较高的光功率密度, 致使这些测量系统在测量其光束质量时都有一定的局限性。本文介绍了一种利用 CCD 成像技术测量垂直腔面发射激光器光束质量的方法, 并测量了在不同驱动电流下垂直腔面发射激光器的 M^2 因子, 简要分析了在垂直腔面发射激光器中影响光束质量的主要因素。

2 实验方法与原理

实验系统由垂直腔面发射激光器, 双凸镜, 衰减片, CCD 探测器及计算机等组成。实验中采用的垂直腔面发射激光器为氧化限制型底发射结构, 图 1 为器件的结构剖面图, 其中激光器的有源区是 InGaAs 量子阱结构, 激光波长为 980 nm, p 型和 n 型分布式布拉格反射镜 (DBR)^[10] 构成谐振腔, 在谐振腔中产生的激光经过 GaAs 衬底直接从底面输出。由绝缘材料 Al_2O_3 构成的限制层不仅能限制光场, 还能限制注入电流的路径。 p 面选用 TiPtAu 作为圆形的平面电极材料, n 面则用 AuGeNi 构成

环形的负电极。图中的曲线示意地描述了垂直腔面发射激光器工作时电流的传输路径。

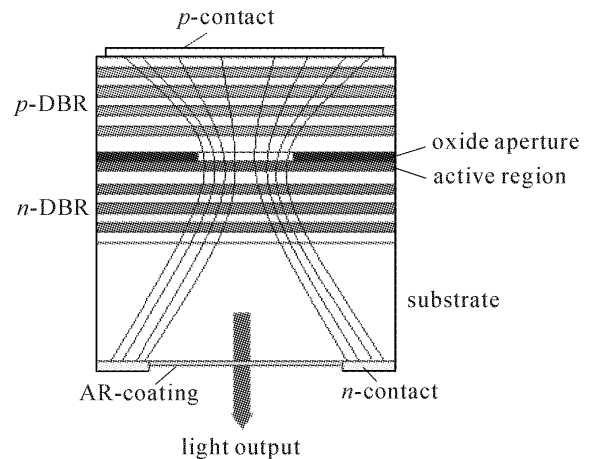


图 1 器件的结构示意图

Fig. 1 Structure of the device

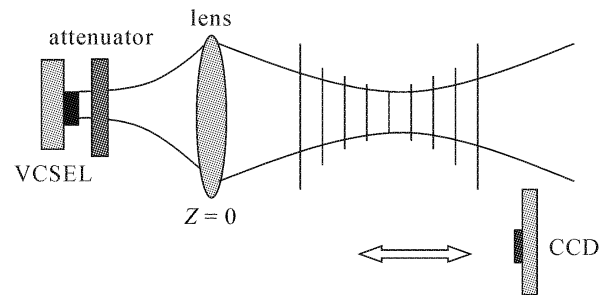


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

在系统中加入 30 dB 的衰减片, 衰减激光光束的振幅, 避免 CCD 饱和。CCD 摄像机采用 SEIKO 公司的 SK420B 系统。主要用来采集不同传播距离所对应的光斑图像, 图像的记录采用 WinDVR 软件, 光束参数计算采用 Matlab 软件。实验装置的示意图如图 2 所示。

测量时, 由垂直腔面发射激光器发射出的光束先经过一个 30 dB 的衰减片, 然后被双凸镜聚焦, 于是沿着传播轴的方向在出射光束中将形成一个束腰 W_0 。对于理想的高斯光束, 在远场区域, 束腰 w_0 与发散角 θ 的乘积是一个常量^[11]

$$w_0 \cdot \theta = \frac{\lambda}{\pi}, \quad (1)$$

但实际的激光光束不可能是理想的高斯光束, 实际光束偏离理想高斯光束的程度用光束质量因子 M^2 来表示。根据 M^2 的概念, 对于实际的激光光束 (为了区分理想光束和实际光束, 采用小写字母描述理想光束, 大写字母描述实际光束)

$$W_0 \cdot \Theta = \frac{\lambda}{\pi} M^2. \quad (2)$$

式中 Θ 为实际光束的发散角。

根据 $1/e^2$ 强度定义的光束束宽^[12], 利用 Matlab 软件对 CCD 采集到的光斑图像进行处理, 从而计算出光束在传播过程中不同位置的光斑半径 $W(Z)$ 。采集光斑图像的过程中, 还要记录下 CCD 相对于双凸镜 ($Z=0$ 处) 的位置 Z 。然后将 $W(Z)$ 和 Z 相应地代入描写实际激光光束传播的高斯公式^[13]

$$W(Z) = W_0 \sqrt{1 + \left[\frac{(Z - Z_0)\lambda M^2}{\pi W_0^2} \right]^2}, \quad (3)$$

其中
$$Z_R = \frac{\pi W_0^2}{\lambda M^2}, \quad (4)$$

Z_0 为束腰所在的位置, Z_R 代表瑞利长度。

最后, 对实验中测得的数据点进行高斯拟合, 从而确定光束质量因子 M^2 的值。另外, 如果知道光学系统的放大率 V , 还可以借助

$$\Theta \approx V \frac{W_0}{Z_R} \quad (5)$$

求出实际光束的发散角 Θ 。

3 结果和讨论

在注入电流分别为 900 mA, 1500 mA, 3000 mA 和 6000 mA 的情况下, 对直径 300 μm 的底发射垂直腔面发射激光器的光束质量参数进行了测量。图 3 是在不同的电流下, 垂直腔面发射激光器所表现出的伏安特性曲线和输出功率特性曲线。测量在室温 (20 $^\circ\text{C}$) 下进行, 器件的正向导通电压约为 1.5 V, 阈值电流为 690 mA。在 1500 mA 连续电流下, 输出功率达到 340 mW。

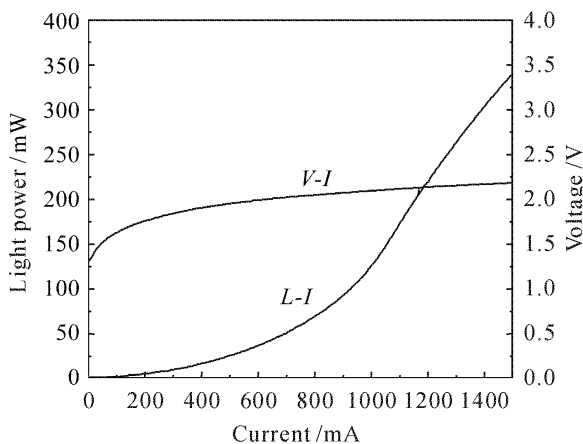


图 3 器件的伏安特性与输出功率曲线
Fig. 3 V-I and L-I curves of the device

图 4 是注入电流为 900 mA 和 3000 mA 时的远场分布图 (FFP), 可以看到, 注入电流为 900 mA

时远场呈环形分布, 发散角约为 14° , 当电流增大到 3000 mA 时, 远场分布为圆形, 远场发散角仅为 8.1° 。这是因为, 当注入电流较小时, 由于大功率垂直腔面发射激光器的出光孔径较大, 导致电流在器件有源区的分布不均匀 (如图 1 所示), 从而形成了环形分布的远场。当电流增大到 3000 mA 时, 有源区的注入电流较为均匀, 于是光束质量也得到大大改善。

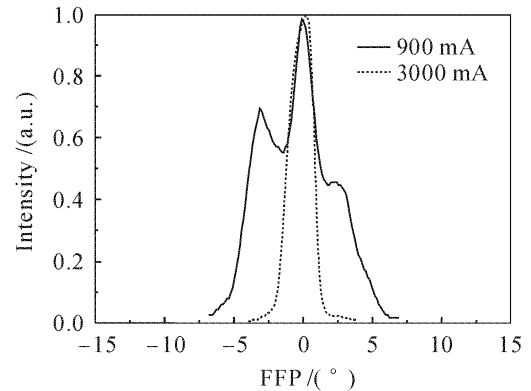


图 4 器件的远场分布

Fig. 4 Far field pattern of the device

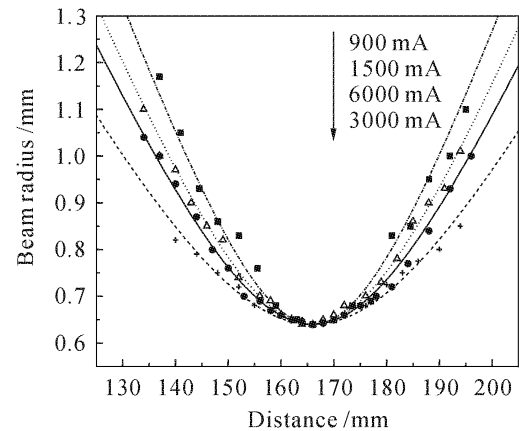


图 5 不同电流下 M^2 的测量结果

Fig. 5 M^2 measurement results for different currents

图 5 采用 4 种不同的符号对实验中测得的 $W(Z)$ 和 Z 进行标记, 它们描述了在不同的注入电流下, 光束半径与光束传播距离的关系。图中的曲线是根据 (4) 式得到的拟合曲线, 其中 M^2 因子作为拟合参数。通过高斯拟合确定了当注入电流分别为 900 mA, 1500 mA, 3000 mA 和 6000 mA 时, M^2 因子的值分别为 66, 58, 44 和 53。

还利用 (5) 式计算了不同电流下的远场发散角 Θ , 其中测量系统的光学放大率 V 为 7.3。图 6 为计算得出的 M^2 因子和远场发散角 Θ 随着驱动电流的变化情况。可以看出当注入电流分别为 900 mA 和 3000 mA 时, 计算所得的远场发散角分别为 13.35°

和 8.9° ,这与上述的测量值十分接近。另外,当注入电流从3000 mA变化到6000 mA时, M^2 因子的值没有变小,而是变大了。这是由于当注入电流较大时,底发射垂直腔面发射激光器所采用的环形 n 面电极结构和孔径有限的有源区很容易造成电流“拥挤”^[14],从而破坏了有源区电流分布,影响了出射光束的质量。

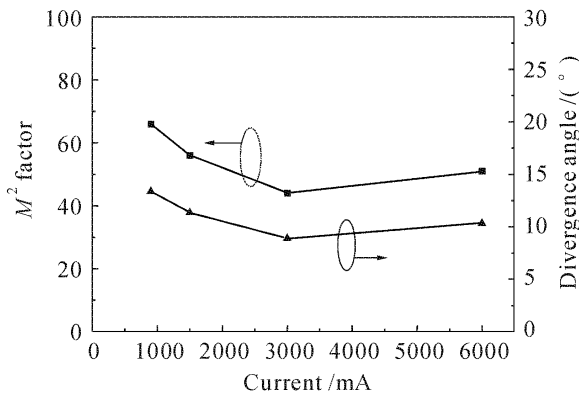


图6 不同电流下的 M^2 和远场发散角

Fig. 6 M^2 values and far-field angles versus the laser current

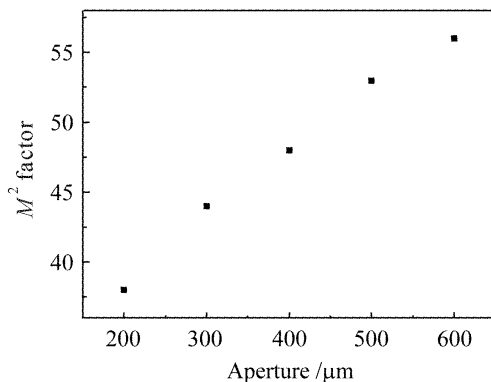


图7 不同出光孔径垂直腔面发射激光器的 M^2

Fig. 7 M^2 of VCSEL with different apertures

最后,在注入电流为3000 mA时,应用上述方法对出光孔径分别为200 μm , 400 μm , 500 μm 和600 μm 的垂直腔面发射激光器的 M^2 因子进行了测量,图7为测试结果,可以看出随着出光孔径的增大, M^2 因子有所增大。

从计算所得的 M^2 因子来看,高功率垂直腔面发射激光器的光束质量比传统的边发射半导体激光器略好,但并不十分理想。主要是高功率垂直腔面发射激光器所采用的大直径以及底发射结构对光束质量产生了影响。较大的出射孔径必然引起注入电流的不均匀,导致了发光层光子数密度的差别,这一点可以从驱动电流较低时的环形远场分布来验证。同时,由于底发射结构垂直腔面发射激光器所发出

的光要经过衬底才能出射,因此GaAs衬底对出射光的吸收作用也影响垂直腔面发射激光器的光束质量。另外,测量中使用衰减片也将对光束质量的测量过程引入一定的误差。

4 结 论

根据光束质量因子(M^2)的概念,利用CCD成像技术设计出一种简单的测量垂直腔面发射激光器的光束质量因子的方法。并研究了出光孔径300 μm 的高功率底发射垂直腔面发射激光器的光束特征。计算了不同传输距离下的光斑直径,并利用高斯公式对测量结果进行了拟合,从而得到了不同注入电流下光束质量因子 M^2 。在电流为900 mA, 1500 mA, 3000 mA和6000 mA的情况下, M^2 因子分别为66, 58, 44和53。计算了不同电流下的远场发散角,并与测量值进行了对比,两者吻合较好。通过分析,高功率的垂直腔面发射激光器所采用的底发射大直径结构是影响光束质量的主要因素,这也为今后高功率垂直腔面发射激光器的设计提出了新的要求。

参 考 文 献

- Hao Yongqin, Liu Wenli, Zhong Jingchang *et al.*. A new process in fabrication of vertical-cavity surface emitting laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4):443~446
郝永芹,刘文莉,钟景昌等. 垂直腔面发射激光器制作新工艺[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4):443~446
- Zhao Lumin, Wang Qing, Yan Changling *et al.*. 980 nm high power vertical cavity surface emitting laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(2):142~144
赵路民,王青,晏长岭等. 980 nm高功率垂直腔面发射激光器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(2):142~144
- Jin Zhenhua, Sun Yanfang, Ning Yongqiang *et al.*. 980nm high power bottom emitting VCSELs [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2005, **24**(1):61~64
金珍花,孙艳芳,宁永强等. 980 nm大功率垂直腔底发射激光器[J]. *红外与毫米波学报*, 2005, **24**(1):61~64
- L. Arthur D'Asaro, Jean-Francois Seurin, James D. Wynn. High-power, high-efficiency VCSELs pursue the goal [J]. *Photonics Spectra*, 2005, (2):64~66
- Ma Ying, Wang Cheng, Miao Tongqun. Blue light laser by direct frequency doubling of VCSEL [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(3):253~259
马莹,王成,缪同群. VCSEL直接倍频蓝光固态激光器的研究[J]. *光学精密工程*, 2005, **13**(3):253~259
- Ihab Kardosh, Fernando Rinaldi. Fabrication and characterization of 980 nm bottom-emitting VCSELs [R]. Annual Report, Optoelectronics Department, University of Ulm, 2005. 45~48
- Aram Mooradian. Pump up the power [C]. *Spie's Oemagazine*, 2002, April:30~33
- Heiko J. Unold, Safwat W. Z. Mahmoud, Roland Jäger *et al.*. Large-area single-mode VCSELs and the self-aligned surface relief [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2001, **7**(2):386~392
- C. H. Chang, T. Earles, D. Botez. High CW power narrow-

- spectral width ($< 1.5 \text{ \AA}$) 980 nm broad-stripe distributed-feedback diode lasers [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(11):954~955
- 10 Huang Yongzhen. Influence of reflection phase of air interface on mode characteristics of vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(2):181~185
黄永箴. 垂直腔面发射激光器中顶层相位对模式特性的影响 [J]. *光学学报*, 2000, **20**(2):181~185
- 11 Chen Yuqing, Wang Jinghuan. *The Principle of Laser* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1998. 218
陈钰清, 王静环. *激光原理* [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1998. 218
- 12 Zhou Wen, Chen Xiufeng, Yang Dongxiao. *Fundamentals of Photonics* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1999. 52
周 文, 陈秀峰, 杨冬晓. *光子学基础* [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1999. 52
- 13 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong *et al.*. *The Principle of Laser* [M]. Fourth Edition. Beijing: National Defence Industry Press, 2000. 75
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘 等. *激光原理* [M]. 第四版. 北京: 国防工业出版社, 2000. 75
- 14 Eric R. Hegblom, Near M. Margalit, Brian J. Thibeault *et al.*. Current spreading in apertured vertical cavity lasers [C]. *SPIE*, 2003, **3003**:176~180

LASER2007' Harbin

第十八届全国激光学术会议第一轮通知

中国光学学会与中国电子学会联合主办的系列会议——第十八届全国激光学术会议, 定于 2007 年 8 月在黑龙江哈尔滨举行。本次会议将为我国激光与光电子新老学者提供探讨新思想、新概念、新技术的交流平台, 促进学术领域的科技创新和科技成果转化。多名院士和著名专家到会作大会报告, 各分会设立高水平的邀请报告。欢迎积极投稿, 踊跃参加。同时欢迎各公司、企事业单位刊登广告、到会展示科技成果产品和发布信息。

会议时间: 2007 年 8 月, 会期 4 天

会议地点: 中国·黑龙江·哈尔滨

主办单位: 中国光学学会、中国电子学会

承办单位: 哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室

名誉主席: 周炳琨院士

会议主席: 范滇元院士、周寿桓院士

会议副主席: 姚建铨、彭堃墀、朱健强、王 骐、王树国

秘书长: 陈德应

会议主题/征稿范围: 1) 激光物理(激光器动力学、激光等离子体物理、X 光激光、激光光谱等); 2) 非线性光学与量子光学; 3) 全固态激光器及新型激光器; 4) 激光信息及处理技术; 5) 激光生物与激光医学; 6) 工业激光及其应用; 7) 激光材料、薄膜及元器件; 8) 光束传输、控制及光束特性

征文要求: 将 500~800 字摘要(用于审稿)和 300 字提要(用于出版)各一份, 以电子邮件附件的形式发送至: Laser2007@hit.edu.cn, 摘要应能准确反映研究成果的创新点, 包括研究目的、方法结果、结论等内容。不引用参考文献、数学公式和化学式。不接受已在国内外正式出版刊物上发表过的论文, 提交截稿日期为 2007 年 5 月 31 日。

来稿需注明论文题目、作者姓名、单位、通讯地址(包括邮编、电话、E-mail 等)、关键词 3~6 个。题目用小三号黑体, 摘要用宋体小四号字按 word 格式编排, 务必在左上角标明所属征稿范围的第几类。一般不接受书面邮寄件。经审稿录用的论文, 将由《中国激光》以增刊形式出版。

会议秘书组联系人及联系电话:

陈德应 0451-86402837, 何伟明 0451-86412710-214,

程元丽 0451-86402920, 王春晖 0451-86402910, 王瑞环 0451-86413164

传真: 0451-86413164, E-mail: Laser2007@hit.edu.cn, 网页: www.Laser2007.hit.edu.cn

地址: 黑龙江哈尔滨南岗区一匡街 2 号哈工大科学园 3031 信箱(王瑞环收), 邮编: 150001

中国光学学会激光专业委员会

中国电子学会量子电子学与光电子学分会

哈尔滨工业大学

可调谐激光技术国家级重点实验室

哈尔滨工业大学光电子技术研究所(代章)

二〇〇七年一月二十二日