

文章编号: 2095-4980(2013)01-0021-05

太赫兹量子级联激光器及其光束表征技术

谭智勇, 曹俊诚

(中国科学院 上海微系统与信息技术研究所太赫兹固态技术重点实验室, 上海 200050)

摘要: 简要介绍太赫兹量子级联激光器(THz QCL)的工作原理及其进展。研究多个器件输出激光的光束质量, 分别采用热探测器阵列和 THz 量子阱探测器(THz QWP)表征连续激光和脉冲激光 THz QCL 激光的光束图形, 对比分析不同热探测器阵列对 THz 激光的表征能力, 比较热探测器阵列和 THz 照相机对平行 THz 激光表征的差异。分析光束改善后 THz 激光光斑的尺寸、二维强度分布等特点, 根据对 THz QCL 输出激光的改善效果, 给出采用外部手段改善 THz QCL 激光光束的几种方法。研究表明, 除了采用精细的波导工艺之外, 锗(Ge)透镜、超半球高阻硅透镜和聚乙烯透镜都是外部改善技术中很好的手段。

关键词: 太赫兹; 量子级联激光器; 光束表征; 量子阱探测器; 热探测器阵列

中图分类号: TN248.4; O432.1⁺2; O482.31 **文献标识码:** A

Terahertz Quantum-Cascade Laser and its beam pattern characterization

TAN Zhi-yong, CAO Jun-cheng

(Key Laboratory of Terahertz Solid-State Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

Abstract: The principle and recent progress of the Terahertz Quantum-Cascade Lasers(QCL) are briefly introduced. The beam quality of different THz QCLs is studied. Beam patterns of continuous wave and pulse modes emitting devices are characterized by employing thermal detector arrays and THz Quantum-Well Photodetector(THz QWP), respectively. The detecting abilities of different arrays are compared and analyzed, and the differences in THz light characterizing between the array and THz camera are also compared. According to the results of the beam improvements, some methods of beam improvement for THz light from the THz QCL are put forward. The germanium(Ge) lens, silicon hyper hemisphere(high resistance) lens and polythene lens are good tools for improving the beam quality of THz QCLs except for employing fine waveguide fabrication process.

Key words: terahertz; Quantum-Cascade Laser(QCL); beam pattern characterization; quantum-well photodetector; thermal detector array

太赫兹量子级联激光器(THz QCL)^[1]是 THz 波段的重要辐射源之一^[2]。它具有体积小、稳定、易集成和能量转换效率高优点, 是 THz 应用技术领域非常重要的一种紧凑型辐射源。随着器件性能的不不断提高^[3-4], THz QCL 在成像^[5]、通信^[6]和外差探测^[7]等领域被广泛研究。器件的优异性能使其在上述领域的潜在应用优势越来越明显。光束质量的好坏是影响器件能否获得实际应用^[8]的重要因素之一。器件激光波长通常大于器件尺寸, 尤其是器件的厚度, 使得器件输出的激光光束质量较差。因此, 在器件应用研究中, 对器件实际输出光束图形的表征, 可以为器件光束质量的改善提供可行的外部方案, 同时也可以对工艺改善后器件的输出光束质量进行评价。本文主要研究 THz QCL 在无线信号传输和扫描成像实验中的光束质量, 分别采用热探测器阵列和单元 THz 量子阱探测器(QWP)^[9]对上述实验光路中的 THz 光束进行了表征。

收稿日期: 2012-12-15; 修回日期: 2012-12-31

基金项目: 科技部 863 主题项目(2011AA010205); 国家自然科学基金资助项目(61131006,61021064); 国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ150021); 中科院重要方向项目(YYYJ-1123-1); 上海市基础研究重点基金资助项目(10JC1417000); 上海市自然科学基金资助项目(11ZR1444200)

1 THz QCL 原理与概述

QCL 是只有电子参与的单极型半导体激光器, THz QCL 是中红外 QCL^[10]在 THz 频段的扩展, 其工作原理如图 1 所示。当器件处于一定外加偏压时, 电子从较高能态跃迁到较低能态, 辐射出光子, 各级产生的光子通过级联增益后以激光的形式辐射出来。器件的辐射波长取决于量子阱中量子限制效应决定的 2 个激发态之间的能量差。通过调节该能量差可以根据需要设计器件的激射频率。目前 THz QCL 的激射频率可覆盖 1.2 THz~5 THz 的多个频点, 在外加磁场辅助下, 器件的最低工作频率可达 0.68 THz^[11]。用于生长 THz QCL 有源区结构的材料主要有 GaAs/AlGaAs 材料体系^[1]和 InGaAs/AlInAs/InP 材料体系^[12], 本文中所涉及到的 THz QCL 均为基于 GaAs/AlGaAs 材料体系的器件。

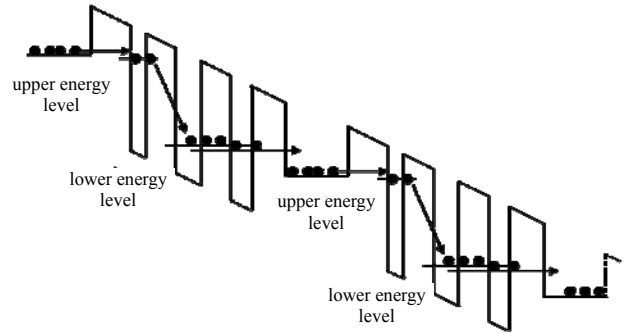


Fig. 1 Schematic of energy band and electron transport in the THz QCL
图 1 THz QCL 能带结构及电子输运示意图

根据电子跃迁方式的不同, THz QCL 的有源区分为啁啾超晶格、束缚态到连续态、共振声子^[11]和散射辅助结构^[13]。目前, 无论是在工作温度还是输出功率方面, 后两种有源区结构的器件性能都比前两种要好。根据波导结构的不同, 器件又分为半绝缘等离子体波导(又称单面金属波导)和双面金属波导^[3]。器件的激射波长通常为 100 μm (3 THz)量级, 而器件的有源区厚度通常只有 10 μm 量级。因此激光从器件脊条端面输出时存在衍射效应, 输出光束较为发散。从性能上来看, 单面金属波导器件的波导限制因子差, 很大一部分光没有被限制在波导内部, 但其光束较为集中, 有效输出功率较高, 远场光束的发散角为 40°左右; 双面金属波导器件由于存在 2 个方向的限制, 其限制因子高, 大部分光都被限制在波导中, 但这会导致器件波导的输出耦合较差, 光束的远场发散角远大于单面金属波导器件的激光发散角。截至目前, THz QCL 的最高工作温度已接近 200 K(脉冲模式)^[14], 连续模式下的最高工作温度为 117 K^[11], 器件的最高输出功率分别为 248 mW(脉冲模式)和 138 mW(连续模式)^[11], 器件通过工艺改善后的最佳光束发散角可小于 10°^[15]。

2 THz QCL 的光束表征

2.1 基于热探测器

热探测器是对 THz 辐射进行探测的传统手段, 目前常用的热探测器主要包括焦热电(如 Pyroelectric Detector, DTGS 等)、热释电(如 bolometer)、高利池(Golay Cell)和热堆探测器, 它们的共同特点都是对热辐射敏感, 响应率较高, 响应范围很宽, 基本都覆盖了 0.1 THz~10 THz 频段。但这一类探测器对红外光敏感, 且响应速度比较慢, 除低温工作的 bolometer 可达到微秒量级之外, 其他几种热探测器的时间常数均在 10 ms 量级。因此, 热探测器适合于对连续输出的 THz 辐射进行有效探测, 而对 THz QCL 输出的脉冲激光, 通常为重复频率 5 kHz、脉宽 500 ns 的激光, 热探测器只能获得其平均功率, 根据占空比计算方可得到器件的脉冲(峰值)功率。采用上述单元探测器可制备热探测器阵列, 目前较为成熟的探测器阵列主要是基于钽酸锂晶体的焦热电阵列探测器和基于微 bolometer 的热视仪。从性能上比较, 热视仪在响应率和信噪比方面均比焦热电阵列探测器优异。另外, 可制备的阵列像素方面, 前者也比后者多 1 个数量级以上。为了验证热探测器阵列中 THz QCL 光束表征中的性能, 分别采用焦热电阵列探测器(PyroCam III, 124×124)和微 bolometer 阵列(C110C, 240×320)探测器测量了 THz QCL 发出的激光经过 1 组离轴抛物面镜(Off-Axis Parabolic mirror, OAP)后的会聚光斑图形, 测量结果分别如图 2(a)和 2(b)所示, 图 2(c)所示为单个椭球复制面反射镜(Ellipsoidal Replicated Mirror, ERM)收集并会聚后采用 C110C 测量的 THz 光斑图形。图 2 中所示为 1.8 mm×2.1 mm 范围内的光斑强度分布情况, 由图可知, 图 2(a)和 2(b)中的光斑尺寸在 1 mm 左右, 图 2(c)的光斑尺寸在 1.5 mm 左右。因此, 在光收集和会聚方面, 单个 OAP 优于 ERM。不过在 THz QCL 的功率测量过程中, 单个 ERM 可以代替 1 组 OAP, 简化了测量装置。

2008 年, 日本 NEC 提出在微 bolometer 阵列的基础上开发出针对 1 THz~7 THz 频段的 THz 照相机, 其解决的关键问题是在传统探测器阵列表面增加了 1 层 1 THz~7 THz 频段的带通金属网格层, 并通过采用 Ge 透镜作为聚焦装置来实现该频段的非制冷 THz 照相机^[16]。

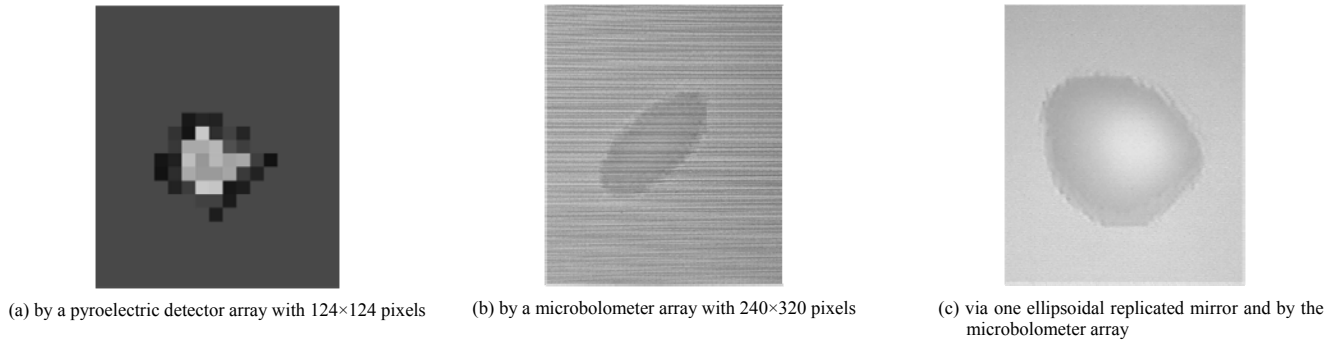


Fig.2 Beam pattern measurement of the THz light, from a THz QCL, via a couple of 90° OAPs
图 2 THz QCL 输出激光经离轴抛物镜(OAP)组后的会聚光斑测量结果

为了与普通热视仪的测量效果进行对比，采用定制的 Ge 透镜与 C110C 组合，对 THz QCL 输出激光经单个 OAP 后的平行 THz 光进行了测量，结果如图 3(a)所示，图 3(b)所示为采用 NEC 最新 THz 相机(T0831C)的测量结果。由图对比可知，新型 THz 相机测量得到的光斑更为清晰可辨，其金属网格层对噪声光的过滤效果非常好。经 Ge 透镜会聚后的光斑尺寸在 1 mm 左右。

2.2 基于 THz 量子阱探测器(THz QWP)

THz QWP^[9]是一种工作在 THz 波段的低维半导体量子器件，目前有效的探测频率范围可覆盖 2 THz~7 THz。THz QWP 是中红外 QWP 在 THz 波段的自然扩展，二者在器件性能和特点上具有相似性。其主要原理为：当外界 THz 光照射器件敏感面时，位于量子阱中束缚态的电子吸收光子能量跃迁至势垒边的连续态，形成的光生载流子(光生电子)在外加偏压下形成光电流，从而实现了对 THz 光的探测。THz QWP 具有响应谱窄，体积小，易集成，响应速度快等优点，在探测过程不需要滤光片，非常适合于 2 THz~7 THz 频段的高速和高速探测，是目前 THz 频段重要的紧凑型快速探测器。

由于热探测器及其阵列的响应速度慢，其对脉冲 THz 光的探测能力有限，尤其是当器件输出功率较小时，测量过程受环境噪声影响很大。为此，采用具有快速响应能力的 THz QWP 测量了脉冲输出功率约为 1 mW 量级 THz QCL 的脉冲激光光束图形。THz QCL 的驱动电压为 2 kHz 重复频率、5 μs 脉宽的脉冲信号。具体的测量过程为：将安装有 THz QWP 的制冷装置及二维平移台放置于 THz QCL 的出射方向，使 THz QWP 的敏感面位于距离 THz QCL 约 60 mm 的平面内，通过二维平移台使 THz QWP 在该平面内移动。水平和垂直方向移动的距离均为 25 mm，将 THz QWP 在每一点的信号强度与其二维位置一一对应起来即得到图 4 所示的结果。由测量结果可知，THz QWP 对不同位置脉冲 THz 光的强度具有很好的分辨能力，非常适合用于脉冲 THz QCL 输出激光的探测。

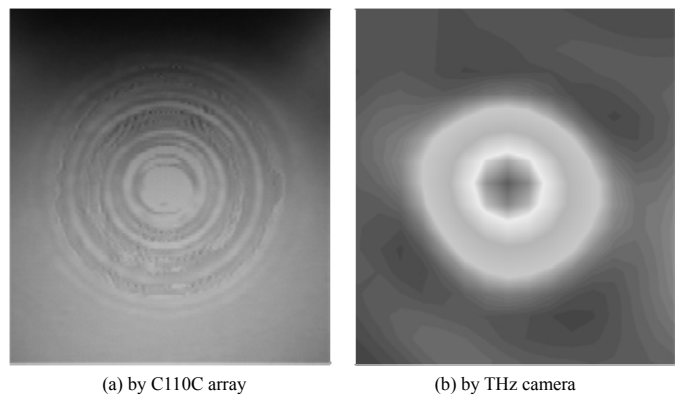


Fig.3 Beam pattern measurement of the parallel THz light via a Ge lens
图 3 THz 平行光经 Ge 透镜后的光束图形测量结果

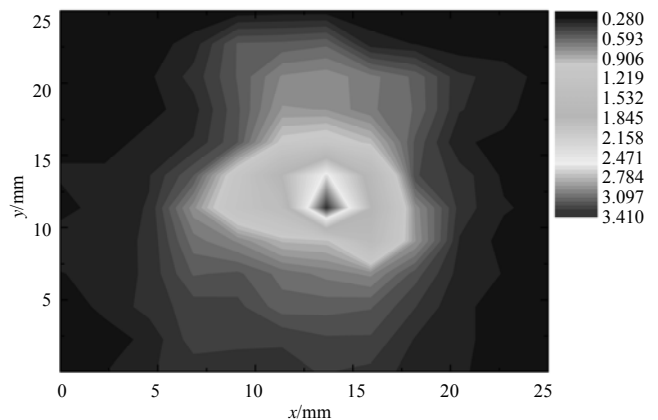


Fig.4 Pulse beam pattern of a THz QCL measured by a THz QWP
图 4 基于 THz QWP 的 THz QCL 脉冲激光光束图形的测量结果

3 THz QCL 的光束改善

由于 THz QCL 激光光束的发散特性, 目前国外的研究小组主要从波导工艺方面对其进行了改善^[11], 也有课题组采用聚四氟乙烯锥(polytetrafluoroethene conical lenses)实现了准贝塞尔 THz 光束^[17]。采用波导工艺来改善器件光束质量对器件工艺的要求很高, 需要高水平的工艺间和工艺过程。改善的手段主要包括表面发射^[18]、分布反馈腔^[19]、光子晶体波导^[20]以及在出射端对应的衬底平面刻蚀光栅结构^[15]。从工艺实现来看, 分布反馈式波导的制备相对较为容易, 光束改善效果好。同时为了提高器件输出功率, 通常在器件脊条的一个端面镀高反金属层, 使得原本从两端出射的激光只从一个端面输出, 提高了器件的有效输出功率。由于分布反馈结构的工艺研究目前还在进行中, 下面主要介绍采用外部方法进行光束改善的技术手段。在 2 THz~5 THz 频段, 电磁辐射主要还是呈现出光的特性, 因此在红外波段常用的光束准直与改善方法大部分都可用于 THz 波段, 且 THz 波段对光学附件表面的平整度和加工精度要求更低。

OAP 是常用的 THz 光收集和改善装置, 经过 OAP 收集并反射后的 THz 光可实现平行光束。然而, 由于 THz QCL 产生的光强在空间分布上并不是均匀的^[21], 简单地采用 OAP 实现的平行光束对于辅助成像或阵列成像用处不大, 一种可行的方法是在平行光束中通过小孔选取一小束用于成像, 但这样会大大降低激光器有效输出激光的利用率。还有一种常用的方法是在 THz QCL 激光输出端面用超半球高阻硅(Si)透镜进行耦合输出, 这样可以实现较好的激光光束, 并可以把大部分的 THz 光通过透镜耦合输出, 透镜对 THz 光的吸收在 20%左右。这也是目前 THz QCL 输出光束进行外部整形的常用手段。由于聚乙烯材料在 THz 波段良好的透过特性, 聚乙烯透镜被广泛应用于 THz 波段, 其对激光光束的会聚效果与高阻 Si 透镜相当, 且价格便宜, 便于加工。图 5 所示为采用聚乙烯透镜组对 THz QCL 输出激光的改善效果, 会聚后的光斑中心尺寸在 1 mm 左右, 周围的环状光晕是由于聚乙烯透镜表面对不均匀分布 THz 光的杂散所造成。当然, 如图 4 所示, 采用 Ge 透镜或透镜组同样可以实现光束的改善, 效果应该比聚乙烯透镜更好一些。其他方法还包括采用温斯顿锥(Winston Cone)、椭球复制面反射镜(主要用于功率测量和扫描成像)、卡塞格林反射镜组等。

实现 THz 激光的高斯光束或贝塞尔光束是目前 THz 功能器件研究的重要方向之一, 也是 THz QCL 器件研究的重要方面, 希望通过类似中红外波段的光纤来实现 THz 激光的远距离有线传输, 通过像光子晶体、微管等微结构来实现 THz QCL 激光的有效改善。

4 结论

本文主要介绍了 THz QCL 的工作原理及其进展, 并对其激光光束的表征及改善进行了测量与分析。分别采用热探测器阵列、THz 照相机表征了连续激射 THz QCL 的输出激光及其改善后的光束图形, 采用 THz QWP 单元器件实现了对脉冲 THz QCL 输出激光光束图形的表征。测量结果表明, 热探测器阵列由于其较高的灵敏度和实时测量特性, 适合于连续激射 THz QCL 激光光束的测量与分析; THz QWP 适合于脉冲激射 THz QCL 激光光束的探测与表征。在光束质量改善方面, 除了采用精细的波导工艺实现良好的光束质量之外, 超半球高阻 Si 透镜、Ge 透镜和聚乙烯透镜都是外部改善技术中很好的改善手段。

参考文献:

- [1] Köhler R, Tredicucci A, Beltram F, et al. Terahertz semiconductor-heterostructure laser[J]. Nature, 2002, 417(6885): 156-159.
- [2] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.
- [3] Kumar S. Recent Progress in Terahertz Quantum Cascade Lasers[J]. IEEE J. Sel. Top. Quant., 2011, 17(1): 38-47.

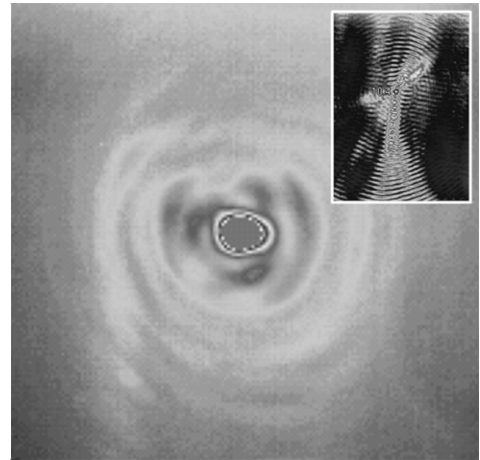
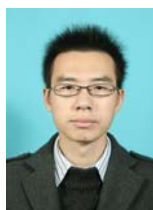


Fig.5 Beam shaping of the light from a THz QCL by a couple of polythene lens, inset: original beam pattern
图 5 采用聚乙烯透镜组对 THz QCL 激光的改善效果, 其中插图为改善前的光束图形

- [4] 段素青,楚卫东,张伟,等. 太赫兹 QCL 的电子结构计算和设计[J]. 信息与电子工程, 2011,9(3):336–341. (DUAN Suqing,CHU Weidong,ZHANG Wei,et al. Calculation and design of electronic structures for terahertz Quantum Cascade Lasers[J]. Information and Electronic Engineering, 2011,9(3):336–341.)
- [5] Lee A W M,Williams B S,Kumar S,et al. Real-time imaging using a 4.3-THz quantum cascade laser and a 320×240 microbolometer focal-plane array[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006,18(13):1415–1417.
- [6] Grant P D,Laframboise S R,Dudek R,et al. Terahertz free space communications demonstration with quantum cascade laser and quantum well photodetector[J]. Electronics Letters, 2009,45(18):952–954.
- [7] Khosropanah P,Zhang W,Hovenier J N,et al. 3.4 THz heterodyne receiver using a hot electron bolometer and a distributed feedback quantum cascade laser[J]. Journal of Applied Physics, 2008,104(11):113106-1–113106-6.
- [8] 杜宇,张伟斌,肖丽. 太赫兹检测技术在炸药检测中的应用[J]. 信息与电子工程, 2011,9(3):287–290. (DU Yu,ZHANG Weibing,XIAO Li. Application of terahertz wave technology in explosive analysis[J]. Information and Electronic Engineering, 2011,9(3):287–290.)
- [9] Liu H C,Song C Y,Spring Thorpe A J,et al. Terahertz quantum-well photodetector[J]. Applied Physics Letters, 2004, 84(20):4068–4070.
- [10] Faist J,Capasso F,Sivco D L,et al. Quantum Cascade Laser[J]. Science, 1994, 264(5158):553–556.
- [11] Benjamin S Williams,Sushil Kumar,Qi Qin,et al. Terahertz quantum-cascade lasers[J]. Nature Photonics, 2007,1(5):517–525.
- [12] Ajili L,Scalari G,Hoyler N,et al. InGaAs-AlInAs/InP terahertz quantum cascade laser[J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(14):141107.
- [13] Kumar S,Chan C W I,Hu Q,et al. A 1.8-THz quantum cascade laser operating significantly above the temperature of $\hbar\omega = k_B T$ [J]. Nature Physics, 2011,7(2):166–171.
- [14] Fatholouloumi S,Dupont E,Chan C W I,et al. Terahertz quantum cascade lasers operating up to ~ 200 K with optimized oscillator strength and improved injection tunneling[J]. Optics Express, 2012,20(4):3866–3876.
- [15] Yu N F,Wang Q J,Kats M A,et al. Designer spoof surface plasmon structures collimate terahertz laser beams[J]. Nature Materials, 2010,9(9):730–735.
- [16] Oda N. Uncooled bolometer-type Terahertz focal plane array and camera for real-time imaging[J]. C. R. Physique, 2010, 11(7–8):496–509.
- [17] Shaukat M U,Dean P,Khanna S P,et al. Generation of Bessel beams using a terahertz quantum cascade laser[J]. Optics Letters, 2009,34(7):1030–1032.
- [18] Fan J A,Belkin M A,Capasso F,et al. Surface emitting terahertz quantum cascade laser with a double-metal waveguide[J]. Optics Express, 2006,14(24):11672–11680.
- [19] Wienold M,Tahraoui A,Schrottke L,et al. Lateral distributed-feedback gratings for single-mode, high-power terahertz quantum-cascade lasers[J]. Optics Express, 2012,20(10):11207–11217.
- [20] Zhang H,Dunbar L A,Scalari G,et al. Terahertz photonic crystal quantum cascade lasers[J]. Optics Express, 2007,15(25): 16818–16827.
- [21] Adam A J L,K ō salynas I,Hovenier J N,et al. Beam patterns of terahertz quantum cascade lasers with subwavelength cavity dimensions[J]. Applied Physics Letters, 2006,88(15):151105-1–151105-3.

作者简介:



谭智勇(1982–), 男, 湖南省宜章县人, 博士, 助理研究员, 上海市优秀毕业生, 主要从事太赫兹量子器件测试及其应用研究. email: zytan@mail.sim.ac.cn.

曹俊诚(1967–), 男, 江西省万年县人, 博士, 研究员, 博士生导师, 国家杰出青年基金获得者, 中科院“百人计划”、新世纪百千万人才工程国家级人选, 上海市优秀学科带头人计划入选者, 上海市自然科学牡丹奖获得者.