

基于衍射光栅耦合输出的一级分布 反馈太赫兹量子级联激光器

朱欢^{1,2}, 王芳芳¹, 颜全¹, 俞辰韧^{1,2}, 常高垒^{1,2}, 陈建新¹, 徐刚毅¹, 何力¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:对比研究了两种不同结构太赫兹波段的双金属波导一级分布反馈量子级联激光器 (THz-DFB-QCL). 提出并实现基于衍射光栅耦合输出的 THz-DFB-QCL 中, 太赫兹波通过衍射光栅而非解理腔面形成出射. 计算表明, 优化衍射光栅的结构可实现约 70% 的激光输出效率和小于 1% 的反射率, 激光发散角约为 $10^\circ \times 50^\circ$. 极低的反射率可以有效抑制反射波对腔内谐振的干扰, 是获得单模激光的关键. 实验上, 利用衍射光栅耦合输出的激光器实现了频率约 2.58 THz 的稳定单模激光, 边模抑制比达 23 dB, 光束分布与理论计算相吻合. 得益于较好的衍射效率和光束准直性, 相比于常规的解理腔面边发射激光器, 通过衍射光栅耦合输出显著提升了激光功率.

关键词:太赫兹; 一级分布反馈; 量子级联激光器; 衍射光栅

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A

Terahertz first-order distributed feedback quantum cascade laser with light extraction via a diffraction grating

ZHU Huan^{1,2}, WANG Fang-Fang¹, YAN Quan¹, YU Chen-Ren^{1,2}, CHANG Gao-Lei^{1,2},
CHEN Jian-Xin¹, XU Gang-Yi¹, HE Li¹

(1, Key Laboratory of Infrared Imaging Material and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: We have studied two different kinds of terahertz first-order distributed feedback quantum cascade lasers (THz-DFB-QCL), both of which are based on a metal-metal waveguide. To realize stable single-mode emission, we have demonstrated for the first time THz-DFB-QCLs in which THz wave is extracted via a diffraction grating. Our simulations illustrate that an optimized diffraction grating will give rise to a diffraction efficiency of about 70%, and a reflectivity less than 1%. It will also result in a laser beam pattern with a low divergence angle of $10^\circ \times 50^\circ$. Such a low reflectivity will keep the mode oscillation inside the DFB grating undisturbed, which is crucial to realize stable single-mode emission. Experimentally, by utilizing a diffraction grating to extract THz wave, we have realized THz-DFB-QCLs with stable single-mode emission near 2.58 THz and the side-mode-suppression-ratio is about 23 dB. The measured laser beam pattern is in good agreement with the calculations. Most importantly, due to the good diffraction efficiency and beam directionality, the diffraction grating based THz-DFB-QCL significantly improves the output power compared with the edge-emitting counterpart.

Key words: terahertz, first-order distributed feedback, quantum cascade lasers, diffraction grating

PACS: 07. 57. Hm

收稿日期: 2017-04-05, 修回日期: 2017-09-19

Received date: 2017-04-05, revised date: 2017-09-19

基金项目: 中国科学院百人计划, 国家自然科学基金项目 (61574149), 国家重点研发计划 (2016YFB0402303, 2016YFA0202200), 预研项目 (41414020901), 中国科学院创新实验室基金项目 (CXJJ-15S098)

Foundation items: Supported by the 100 Talents Project of Chinese Academy of Sciences, National Natural Science Foundation of China (61574149), National Key R&D Plan (2016YFB0402303, 2016YFA0202200), Pre-research Foundation (41414020901), and Foundation of Innovation Laboratory of Chinese Academy of Sciences (CXJJ-15S098)

作者简介 (Biography): 朱欢 (1991-), 男, 山东菏泽人, 博士研究生, 研究领域为太赫兹量子级联激光器. E-mail: zhuhuanchuan@126.com

引言

太赫兹量子级联激光器 (THz-QCL) 具有频率覆盖范围宽、能量转换效率高、体积小、易集成等优点,是太赫兹波段极具竞争力的相干光源,在物质检测、光谱分析、成像和通信等领域有重要的应用前景^[1-4]. 单模 THz-QCL 具有线宽极窄、波长可调谐、功率密度大等特点,是目前研究的焦点^[5-6].

THz-QCL 是单极型半导体激光器,它通过电子在半导体耦合量子阱中导带子带间的辐射跃迁产生光子. 通过改变势阱和势垒的宽度调节激光能级的位置从而灵活地改变激光频率,THz-QCL 的激光频率已覆盖 1.0 ~ 5.0 THz^[3]. 此外,级联结构的设计使得一个电子在穿越有源区时产生多个光子,从而显著提高了激光功率. 另一方面,THz-QCL 的激光波长达到百微米量级,远远超过激光器有源区的厚度(约 10 μm),这使得在 THz-QCL 中构建电磁场的传输与谐振成为严峻的挑战,传统由折射率差导引的波导结构因光学限制因子太低而不再适用. 为克服光学限制因子过低的瓶颈问题,目前 THz-QCL 主要采用两种波导结构:单面等离子波导和双金属波导,这两种波导各有优缺点. 单面等离子波导利用金属与有源区界面处形成的表面等离子波将光学限制因子提高到 20% ~ 30%,并且有合适的腔面反射率,可以在低温下获得较高的输出功率. 但仍然偏低的光学限制因子导致激光器性能随工作温度升高而迅速衰退. 双金属波导可以将太赫兹波完全局域在厚度远小于波长的有源区内,其光学限制因子接近 100%,因而有较好的温度特性. 但由于双金属波导激光器的腔面高度就是有源区的厚度,远小于波长,导致低的出光效率和极为发散的光束分布^[3].

为获得单模激射的 THz-QCL,需要在激光器谐振腔中引入光的选模机制^[7-11, 14-15]. 因为双金属波导激光器可以工作在更高的温度,目前大部分研究聚焦在实现双金属波导 THz-QCL 的单模激射并提高激光功率和光束准直性. 这方面代表性的研究成果包括, S. Kumar 等率先研制出了面发射的二级分布反馈 THz-QCL^[7],实现了稳定的单模激射并可以通过分布反馈光栅的周期调节激光波长. L. Mahler 等人实现了双缝二级分布反馈 THz-QCL,在一定频率范围内可以激发辐射效率高的光学模式,从而有效提高了单模激光的功率^[8]. R. Colombelli 等人将一维分布反馈光栅推广至二维光子晶体,研制出基

于光子晶体谐振腔的面发射 THz-QCL^[9],借助二维光子晶体显著增加的出光孔径将光束发散角降低至约 $14^\circ \times 14^\circ$. J. Faist 小组研制出三级分布反馈 THz-QCL,利用相位匹配显著提高了单模激光的功率效率和光束准直性,实现了 17 mW 的单模连续激射^[10]. 徐刚毅等人在 THz-QCL 中引入光子异质结构,通过调控谐振腔内部电磁场的分布,选择性地激发了具有高辐射效率的光学模式,从而显著提高了单模激光的输出功率以及功率效率,在脉冲模式和连续模式下激光功率分别达到 103 mW 和 27 mW^[11].

一级分布反馈 (DFB) 激光器是常用且非常有效获得单模激光的方法,在近红外和中红外半导体激光器中得到广泛应用^[12-13],在太赫兹波段却很少有研究报道. 中科院半导体所刘峰奇小组在近期报道了基于单面等离子波导结构的太赫兹一级分布反馈量子级联激光器 (THz-DFB-QCL)^[14]. 在温度特性更好的双金属波导中实现 THz-DFB-QCL 却面临极大的挑战. 常规一级分布反馈激光器通过解理的腔面形成边发射,太赫兹波在双金属波导的腔面处有很大的反射率 (70% ~ 80%),反射波相位和解理面的位置有关,具有随机性,容易破坏分布反馈光栅内的模式分布,导致难以获得稳定的单模输出. Q. Hu 等人通过深紫外曝光和感应耦合等离子体刻蚀技术,刻蚀出腔面以精确控制反射波的相位,从而研制出单模激射的双金属波导 THz-DFB-QCL^[15]. 这是迄今为止唯一报道的基于双金属波导的 THz-DFB-QCL,该实验通过刻蚀形成腔面,要求刻蚀面非常光滑且陡直,实验难度非常大.

针对上述问题,本文对比研究了两种结构的双金属波导 THz-DFB-QCL. 第一种为常规器件,即通过解理的腔面形成边发射. 实验证实,该结构呈现多模激射且激光功率极低. 第二种结构是我们首次提出的基于衍射光栅耦合输出的 THz-DFB-QCL. 我们在分布反馈光栅的一侧依次构建衍射光栅和吸收边界,使其具有较高的衍射效率和极低的反射率,从而将太赫兹波高效耦合输出并避免了反射波对分布反馈光栅内谐振模式的干扰,最终实现了稳定的单模激射并显著提升了激光功率和光束准直性.

1 器件的结构与模拟

1.1 材料结构与器件设计

所用激光器材料是分子束外延的 GaAs/Al_{0.15}

$\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 超晶格,有源区为“束缚态到连续态跃迁”的设计结构^[16].有源区包含 90 个周期性重复的模块,每个模块包含的势阱和势垒厚度依次为:11.4/2.0/12.0/2.0/12.2/1.8/12.8/1.5/15.8/0.6/9.0/0.6/14.0/3.8/11.6/3.5/11.3/2.7 (nm),其中每个模块的前两个势阱层(厚度分别为 11.4 和 12.0 nm)为 n 型掺杂,掺杂浓度是 $1.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. 该有源区设计的中心工作频率约为 2.5 THz. 从衬底开始的外延结构依次为 300 nm 的 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 腐蚀阻挡层、700 nm 的 n^+GaAs 下接触层(掺杂浓度为 $2.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)、90 个周期的有源区,以及 50 nm 厚的 n^+GaAs 上接触层(掺杂浓度为 $5.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$),整个外延结构的厚度约为 13 μm .

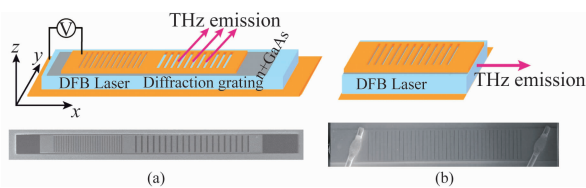


图 1 (a) 基于衍射光栅耦合输出的双金属波导 THz-DFB-QCL 结构示意图及 SEM 照片, (b) 通过解理腔面边发射的双金属波导 THz-DFB-QCL 结构示意图及 SEM 照片

Fig. 1 Schematic illustration and SEM picture of a THz-DFB-QCL with metal-metal waveguide, (a) where a diffraction grating is utilized to extraction the THz radiation, and (b) where light is emitted from the cleaved facet

图 1(a) 显示了基于衍射光栅耦合输出的双金属波导 THz-DFB-QCL 的原理图以及一个典型器件的 SEM 照片. 该器件有源区的上下均为金属层. 在上金属层中分别形成分布反馈光栅和衍射光栅. 在脊条的两端以及横向边缘由未被金属覆盖的 n^+GaAs 接触层构成太赫兹波的吸收边界,其作用是近似完美地吸收进入脊条两端的太赫兹波以避免反射波对腔内谐振的干扰,并抑制高阶横模的产生. 分布反馈光栅的周期满足 $\Lambda = \lambda / (2 \times n_{\text{eff}})$,其中 Λ 为光栅周期, λ 为自由空间太赫兹波的波长, n_{eff} 为双金属波导结构的有效折射率. 分布反馈光栅提供谐振,然而它产生的太赫兹激光并不直接通过腔面形成辐射,而是首先入射到右侧的衍射光栅区域,通过衍射光栅的耦合形成输出,透射穿过衍射光栅的太赫兹波则被脊条末端的 n^+GaAs 吸收边界所吸收. 值得注意的是,衍射光栅不但会对入射的太赫兹波形成衍射,也存在反射和透射. 而反射的太赫兹波将会与分布反馈光栅内部的太赫兹谐振波产生叠加,进而影响谐振波的场分布

和品质因子. 因此,该器件设计的核心是降低衍射光栅对入射波的反射,避免对分布反馈光栅内谐振模式的干扰.

图 1(b) 显示了通过解理腔面形成边发射的双金属波导 THz-DFB-QCL 的原理图和一个典型激光器的 SEM 照片. 在两种 THz-DFB-QCL 器件中,DFB 光栅的结构完全相同.

1.2 器件模拟

我们首先确定分布反馈光栅的结构. 我们利用外延材料制备了双金属波导的法布里-珀罗(FP)腔激光器,实验结果显示激光器的工作波长范围为 2.40 ~ 2.63 THz,与设计的工作中心频率 2.50 THz 一致. 根据激光器的实际工作频率以及分布反馈光栅与波长的关系式,我们把分布反馈光栅周期确定在约 20 μm . 实验中光栅是通过在上金属层中形成周期性的空气狭缝来获得的,光栅的占空比(空气狭缝宽度与光栅周期之比)以及光栅的周期数目决定了光学模式的电磁场分布以及品质因子,从而决定了激光器的阈值电流密度、功率以及功率效率等性能. 根据二维时域有限差分计算结果,我们选择分布反馈光栅占空比为 25%,光栅周期数目为 29,对应的辐射损耗约为 1.3 cm^{-1} . 通常双金属波导结构的材料损耗——主要来源是有源区掺杂引入的自由载流子吸收以及上下金属层引入的损耗——约为 $15 \sim 20 \text{ cm}^{-1}$. 由此可见,分布反馈光栅的辐射损耗远小于波导损耗,这有利于降低器件的阈值电流密度并使激光器具有较大的动力学范围.

针对基于衍射光栅耦合输出的双金属波导 THz-DFB-QCL,进一步通过数值模拟确定衍射光栅的结构参数. 衍射光栅的周期、占空比以及周期数目决定了衍射光栅对入射太赫兹波的反射率、衍射效率、透射率,以及衍射光束的远场分布. 利用二维有限元方法计算了太赫兹波沿着波导入射到衍射光栅所产生的反射、衍射和透射情况,并以此优化了衍射光栅的结构参数. 图 2(a) 显示了结构优化后的计算结果,其中衍射光栅周期为 46.4 μm ,狭缝宽度为 12 μm ,衍射光栅包含 20 个周期. 可以看到在整个激光频率范围(2.40 ~ 2.63 THz)内,衍射光栅对太赫兹波的反射率均低于 1%,而衍射效率大于 70%. 极低的反射率表明,衍射光栅的存在不会对分布反馈光栅内的谐振模式产生干扰,并且太赫兹波不会在衍射光栅内部产生谐振. 超过 70% 的衍射效率表明大部分入射到衍射光栅的太赫兹波将以衍射的方式形成激光输出. 图 2(b) 是由二维时域有限差分方

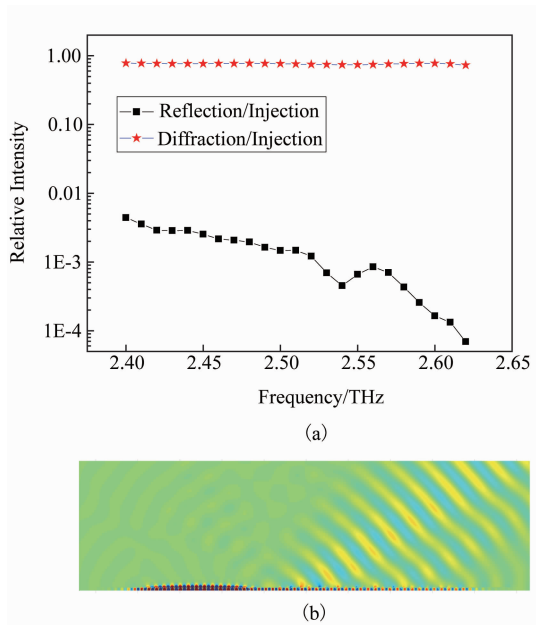


图2 (a) 由二维有限元方法计算的衍射光栅对入射太赫兹波的反射率及衍射效率, (b) 二维时域有限差分方法计算得到的沿着脊条截面的电磁场模式分布, 实际显示的是电场竖直方向分量(E_z)的分布
 Fig. 2 (a) Relative intensity of the reflected and diffracted wave caused by the diffraction grating, calculated by 2D FEM method, and (b) mode distribution (vertical component of the electric field) along the cross-section of the device, calculated by 2D FDTD

法计算得到的整个器件内电磁场(实际显示的是竖直方向电场 E_z) 的分布, 可以清楚地看到太赫兹波在 DFB 光栅区域形成的谐振, 以及太赫兹波注入到衍射光栅区域后所形成的传播和通过衍射形成的耦合输出. 图 3(a) 定义了激光器光束分布的方位角, 而图 3(b) 显示了通过三维时域有限差分方法计算得到的通过衍射光栅耦合输出的太赫兹激光在远场的光束分布. 计算显示, 光束主极大的方位角为 $\theta_x = 0^\circ$, $\theta_y = 42^\circ$, 光束发散角的半高全宽约为 $10^\circ \times 50^\circ$. 光束发散角与出光孔径相关, 通过衍射光栅耦合输出的 THz-DFB-QCL, 其出光孔径就是衍射光栅的表面, 它的面积明显大于解理腔面. 因此, 通过衍射光栅输出的光束比解理腔面边发射的光束有更好的方向性.

2 实验方法

通过固态源分子束外延技术在半绝缘 GaAs 衬底上生长激光器材料, Si 为材料的 n 型掺杂材料. 图 4 是材料的双晶摇摆曲线, 可以观察到多个卫星峰, 根据卫星峰位置计算得到的周期厚度 140.5 nm, 与

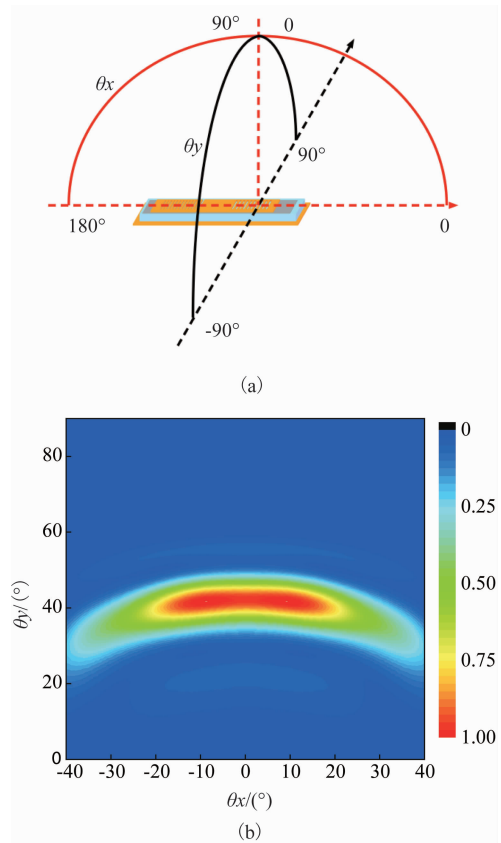


图3 (a) 激光器远场光束方位角的定义, (b) 由时域有限差分方法计算得到的通过衍射光栅耦合输出的激光光束分布
 Fig. 3 (a) Schematic diagram defining the scanning angles used in the beam-profiling measurement, and (b) the calculated far-field beam pattern of a THz-DFB-QCL where light is extracted from a diffraction grating

设计值接近.

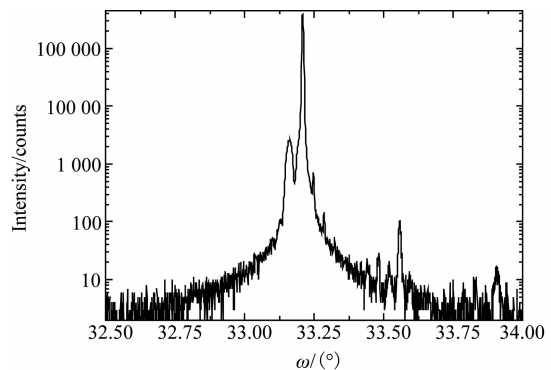


图4 激光器材料的双晶摇摆曲线
 Fig. 4 X-ray diffraction of THz-QCL

本文研究的两种双金属波导 THz-DFB-QCL 所采用的器件制备流程是兼容的, 因此可以在一个芯片上同时制备. 唯一的区别在于边发射的 THz-DFB-

QCL 没有衍射光栅结构和脊条两端的吸收边界. 在此主要叙述基于衍射光栅耦合输出的双金属波导 THz-DFB-QCL 的器件制备过程. 为了制备双金属波导, 需要在有源区和衬底之间插入一层金属. 利用晶片键合实现这一目的: 在外延材料表面和一块 n^+ GaAs 支撑衬底上分别利用电子束蒸发生长 Ti (10 nm)/Au (500 nm), 并通过金金键合使两片晶圆键合在一起, 然后通过研磨和选择性腐蚀去除半绝缘衬底. 至此, 已将外延材料倒扣转移到了 n^+ GaAs 支撑衬底上, 并在外延层和衬底之间插入了 Ti/Au 金属层, 该金属层既是激光器的下电极, 也是双金属波导中有源区下方的金属层. 在此基础上, 通过光刻、电子束蒸发生长 Ti/Au 以及剥离等工艺在有源区的上方形成金属层, 该金属层既是激光器的上电极, 也是双金属波导结构的上金属层. 在上金属层中形成周期性的空气狭缝以构成分布反馈光栅和衍射光栅. 其中分布反馈光栅的占空比为 25%, 所包含的周期数为 29, 制备了一组不同分布反馈光栅周期的器件. 衍射光栅周期确定为 46.4 μm , 占空比 30%, 周期数目为 20. 通过光刻板版图控制使得靠近脊条两端处不蒸发上金属层, 亦即两端处的 n^+ GaAs 接触层未被金属层覆盖, 从而具有较高的吸收系数并以此充当激光器的吸收边界^[9]. 在制备上金属层和光栅结构后, 通过感应耦合等离子体刻蚀工艺形成脊条. 最后通过衬底减薄抛光, 以及在衬底侧蒸发 Ti/Au 金属用于焊接, 由此完成整个器件制备过程. 图 1 显示了两种激光器的 SEM 照片, 实验中在一个芯片上同时制备了这两种激光器以准确地对比它们的性能. 器件通过钢焊接到无氧铜热沉上, 通过金丝球焊引出电极后将器件连同热沉安装在低温杜瓦的冷指上.

在测量激光器光谱和电流-电压-功率特性时, 由脉冲电压源 (Avtech-2B-B) 提供脉冲激励, 脉宽和重复频率分别为 1 μs 和 100 kHz, 对应的占空比为 10%. 激光器所发射的太赫兹激光经离轴抛物镜准直后导入傅里叶光谱仪 (Nicolet 8700) 以测量器件的光谱特性并用光谱仪自带的探测器测量激光器的相对功率, 光谱仪的分辨率为 0.125 cm^{-1} . 由于太赫兹探测器响应频率远小于 100 kHz (其最佳响应频率约为 20 ~ 50 Hz), 通过波形发生器产生一个 40 Hz、50% 占空比的方波作为门控信号调制脉冲电压源, 并通过电流探头和电压探头测量实际加载到激光器上的电流与电压. 在测量相对功率时, 把探测器接收到的电压信号接入锁相放大器中以进一

步提高信噪比.

3 实验结果与讨论

考察通过解理腔面边发射的 THz-DFB-QCL 的光谱特性, 结果如图 5(a) 所示. 3 个激光器的 DFB 光栅周期分别为 20.0 μm 、20.3 μm 及 20.6 μm , 激光器呈现多模激射且激光波长与 DFB 光栅周期没有明确的对应关系. 该实验结果很好地验证了之前的分析, 即解理的腔面具有高达 70% ~ 80% 的反射率, 而且反射波的相位受腔面解理位置的影响难以控制, 因此反射波对腔内谐振模式的影响是随机的, 导致出现多个激光模式.

基于衍射光栅耦合输出的 THz-DFB-QCL 则显示出截然不同的光谱特性. 图 5(b) 显示了 3 个该类型激光器的光谱特性, 其中 DFB 光栅周期分别为 20.4 μm 、20.6 μm 及 20.8 μm , 激光器呈现单模激射, 对应的激射波长分别为 115.96 μm 、116.61 μm 及 117.27 μm . 该结果显示, 激光波长随着分布反馈光栅的周期成线性变化, 所对应的双金属波导有效折射率为 $n_{\text{eff}} = 2.83$, 与通过 Drude 模型以及有限元方法计算得到的波导有效折射率 (2.88) 非常接近, 这充分说明了激光器工作在 DFB 模式. 该结果验证了衍射光栅具有足够小的反射率, 对分布反馈光栅内的谐振模式没有形成干扰, 与图 2(a) 显示的数值模拟结果是一致的. 进一步的光谱测试表明, 该类激光器在整个动力学范围内均呈现单模激射. 图 5(c) 是激光器达到峰值功率时的激光光谱, 其边模抑制比超过 23 dB, 体现出较好的单模特性.

进一步对比了解理腔面边发射和衍射光栅耦合输出的 THz-DFB-QCL 的电流-电压-功率特性, 测试温度为 20 K, 为清晰起见, 由腔面出射的器件, 其激光功率被乘以 10, 可以看出衍射光栅耦合输出的功率远大于从解理腔面出射的功率, 结果如图 6 所示. 由图可知, 两种激光器具有非常接近的阈值电流密度, 但由衍射光栅形成输出的激光器所达到的峰值激光功率是边发射激光器的约 27 倍! 主要原因有两个: 1) 计算得到的衍射光栅耦合输出效率超过 70%, 显著大于太赫兹波在解理腔面的透射率 (20 ~ 30%). 2) 解理腔面的高度远小于激光波长, 导致光束高度发散, 光的收集效率低^[17]. 而通过衍射光栅耦合输出时, 衍射光栅的表面即为出光孔径并明显大于太赫兹波长, 从而显著降低了出射激光的发散角. 图 7 显示了由衍射光栅耦合输出激光光束的远场分布, 光束发散角的半高全宽为 $8.5^\circ \times 37^\circ$, 与

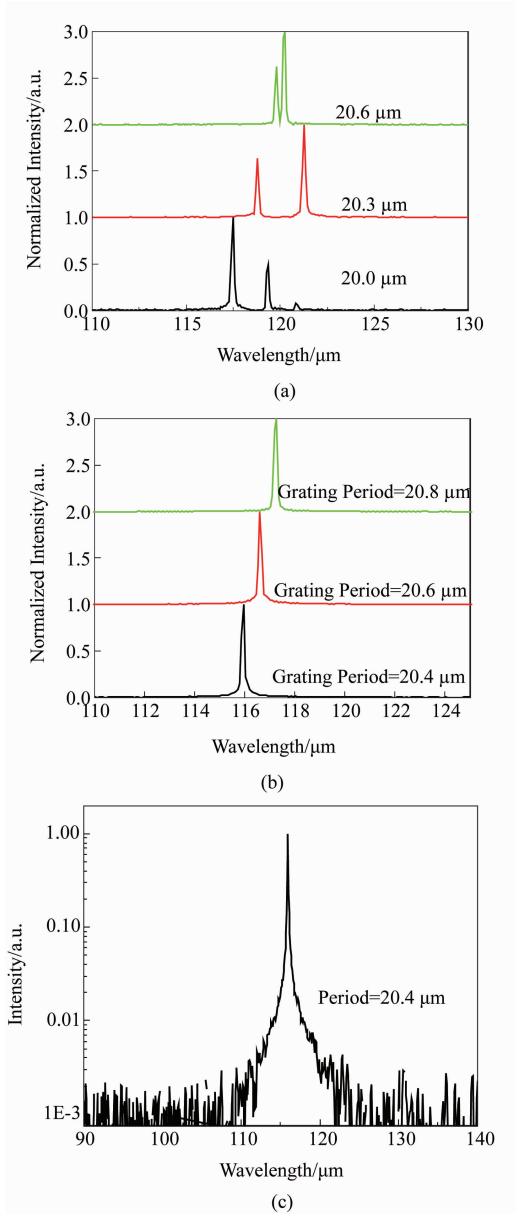


图 5 (a) 腔面边发射的双金属波导 THz-DFB-QCL 的光谱结果,3 个器件的 DFB 光栅周期分别为 20.0 μm , 20.3 μm , 20.6 μm , (b) 由衍射光栅耦合输出的双金属波导 THz-DFB-QCL 的发射光谱,3 个器件的 DFB 光栅周期分别为 20.4 μm , 20.6 μm , 20.8 μm , (c) 通过衍射光栅输出的激光器在峰值功率时的光谱图,其中 DFB 光栅周期为 20.4 μm , 衍射光栅为 46.4 μm , 边模抑制比超过 23 dB

Fig. 5 (a) Emission spectra of double-metal waveguide THz-DFB-QCLs with facet emission. The DFB periodicities of the three device are 20.0 μm , 20.3 μm , 20.6 μm , respectively. (b) Emission spectra of three double-metal waveguide THz-DFB-QCLs via diffraction grating emission. The DFB periodicity changes from 20.4 μm to 20.8 μm . (c) Laser spectra at maximum output power of a diffraction grating emitting device, in which the periodicity of the DFB grating is 20.4 μm and the periodicity of the diffraction grating is 46.4 μm , the side-mode suppression ratio > 23 dB

图 3(b) 所示的计算结果能够较好地吻合. 更为准确

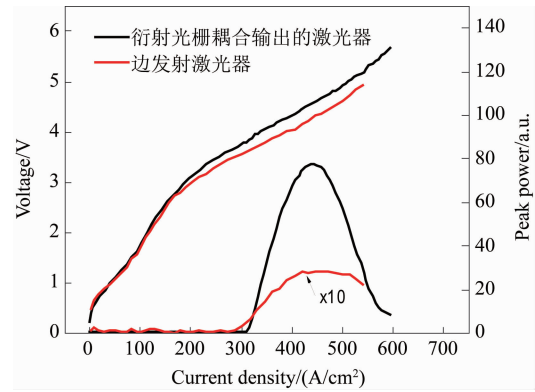


图 6 腔面出射和衍射光栅耦合输出的双金属波导 THz-DFB-QCL 的激光功率对比

Fig. 6 $L-I-V$ characteristics of double metal waveguide THz-DFB-QCL, in which light is emitted via a facet or a diffraction grating, respectively

的光束提高了激光的收集效率,从而提高了测试得到的激光功率.

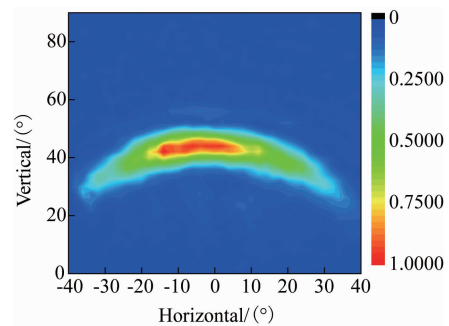


图 7 通过衍射光栅耦合输出的太赫兹激光的远场光束分布的测试结果

Fig. 7 Measured far-field beam pattern of a diffraction-grating-emitting laser

针对衍射光栅耦合输出的双金属波导 THz-DFB-QCL,可以通过结构的改进实现激光功率的进一步提高. 本实验采用在上金属层中形成周期性的空气狭缝以制备分布反馈光栅,这种光栅结构引入较大的有效折射率差,导致太赫兹波被强烈地局域在分布反馈光栅的中心,不利于提高激光器的输入功率和辐射效率. 而激光器的输出功率正比于输入功率与辐射效率的乘积. 为解决上述问题,可以在有源区顶部通过湿法腐蚀形成光栅并覆盖金属. 此时分布反馈光栅的有效折射率差由腐蚀深度决定,并可以在一定范围内调节. 通过优化腐蚀深度和光栅包含的周期数目,可以使 THz-DFB-QCL 具有较低的阈值电流密度、合适的输入功率和较高的辐射效率,从而提高激光器的输出功率. 相应的实验工作正在进行中.

4 结论

结合理论设计和实验实现了基于衍射光栅耦合输出的双金属波导 THz-DFB-QCL. 器件采用衍射光栅取代解理腔面作为太赫兹波出射结构, 通过优化设计使得衍射光栅具有较高的光耦合输出效率和极低的反射率, 避免了反射波对腔内谐振模式的干扰. 所研制的激光器稳定地工作在 DFB 模式, 其边模抑制比超过 23 dB, 并获得了单瓣的激光光束, 发散角半高全宽为 $8.5 \times 37^\circ$, 具有较好的准直性. 本工作还验证了, 常规的通过解理腔面形成边发射的双金属波导 THz-DFB-QCL, 由于受到反射波的干扰, 无法获得单模激射. 本文获得的基于衍射光栅耦合输出的双金属波导 THz-DFB-QCL 为实现大功率、波长可调谐的单模 THz 激光提供了新的解决方案.

References

- [1] Kohler 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]. *Nat. Photon.*, 2007, **1**(2): 97 – 105.
- [3] Williams B S. Terahertz quantum-cascade lasers [J]. *Nat. Photon.*, 2007, **1**: 517 – 525.
- [4] Davies A G, Linfield E H, Johnston M B. The development of terahertz sources and their applications [J]. *Phys. Med. Biol.*, 2002, **47**: 3679.
- [5] Rabanus D, Graf U U, Philipp M, *et al.* Phase locking of a 1.5 Terahertz quantum cascade laser and use as local oscillator in a heterodyne HEB receiver [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(3): 1159 – 1168.
- [6] Ren Y, Hovenier J N, Higgins R, *et al.* High-resolution heterodyne spectroscopy using a tunable quantum cascade laser around 3.5 THz [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, **98**: 231109.
- [7] Kumar S, Williams B S, Qin Q, *et al.* Surface-emitting distributed feedback terahertz quantum-cascade lasers in metal-metal waveguides [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**: 113 – 128.
- [8] Mahler L, Tredicucci A, Beltram F, *et al.* High-power surface emission from terahertz distributed feedback lasers with a dual-slit unit cell [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**: 191109.
- [9] Chassagneux Y, Colombelli R, Maineult W, *et al.* Electrically pumped photonic-crystal terahertz lasers controlled by boundary conditions [J]. *Nature*, 2009, **457**: 174 – 178.
- [10] Amanti M I, Fischer M, Scalfari G, *et al.* Low-divergence single-mode terahertz quantum cascade laser [J]. *Nat. Photon.*, 2009, **3**: 586 – 590.
- [11] Xu G, Colombelli R, Khanna S P, *et al.* Efficient power extraction in surface-emitting semiconductor lasers using graded photonic heterostructures [J]. *Nat. Commun.*, 2012, **3**: 952.
- [12] Carro P D, Camposo A, Stabile R, *et al.* Near-infrared imprinted distributed feedback lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**: 201105.
- [13] Darvish S R, Zhang W, Evans A, *et al.* High-power, continuous-wave operation of distributed-feedback quantum-cascade lasers at $\lambda \sim 7.8 \mu\text{m}$ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**: 251109.
- [14] Wang T, Liu J, Li Y, *et al.* High-power distributed feedback Terahertz quantum cascade lasers [J]. *Electron Dev Lett.*, 2013, **34**: 1412 – 4.
- [15] Williams B S, Kumar S, Hu Q, *et al.* Distributed-feedback terahertz quantum-cascade lasers with laterally corrugated metal waveguides [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **30**: 2909 – 2911.
- [16] Barbieri S, Alton J, Beere H E, *et al.* 2.9 THz quantum cascade lasers operating up to 70 K in continuous wave [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(10): 1674 – 1676.
- [17] Adam A J L, Kasalynas I, Hovenier J N, *et al.* Beam patterns of terahertz quantum cascade lasers with subwavelength cavity dimensions [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**: 151105.
- [18] 等. 基于四象限探测器的斯托克斯向量测量仪. *红外与毫米波学报*, 2016, **35**(1): 57 – 62.
- [20] Andrae M O, Gelencsér A. Black carbon or brown carbon The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, **6**(10): 3131 – 3148.
- [21] Li H, Wang Q, Yang M, *et al.* Chemical characterization and source apportionment of PM 2.5 aerosols in a megacity of Southeast China [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **181**: 288 – 299.
- [22] Renard J B, Worms J C, Lemaire T, *et al.* Light scattering by dust particles in microgravity: polarization and brightness imaging with the new version of the PROGRA2 instrument [J]. *Applied optics*, 2002, **41**(4): 609 – 618.
- [23] Renard, Jean-Baptiste, *et al.* Small-angle light scattering by airborne particulates: Environnement SA continuous particulate monitor [J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, **21**(8): 085901.
- [24] Patterson E M, Gillette D A, Stockton B H. Complex index of refraction between 300 and 700 nm for Saharan aerosols [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1977. **82** (TOC): 3153 – 3160.

(上接第 705 页)