

差频法产生太赫兹抽运源的光子集成芯片

孙梦蝶 谭少阳 郭菲 刘松涛 陆丹 吉晨

中国科学院半导体研究所材料科学重点实验室, 北京 100083

摘要 为实现高效率、小型化、可调谐、室温下稳定运转的半导体太赫兹(THz)波源,提出了采用光子集成技术,将两个并联的分布反馈(DFB)激光器与无源多模干涉耦合器(MMI)集成,输出THz拍频抽运光束的方案。两DFB激光器的光栅布拉格波长设计偏调为4.8 nm(0.6 THz),通过改变集成器件中DFB激光器的注入电流进行波长调谐,每路DFB能够达到3.9 nm的波长偏调。将拍频光束通过单模光纤耦合到频域分辨光学门(FROG)中对THz拍频光束空间拍频包络进行测量,在不同的DFB区注入电流下,证实了集成芯片在0.184~1.02 THz频率调谐范围内可室温连续输出用于产生THz波的有效THz拍频光束。

关键词 集成光学; 太赫兹源; 差频产生法; 频域分辨光学门; 分布反馈激光器; 多模干涉耦合器

中图分类号 TN365

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.091302

Photonic Integrated Circuit for Generation of Terahertz Pumping Source by Difference-Frequency Generation

Sun Mengdie Tan Shaoyang Guo Fei Liu Songtao Lu Dan Ji Chen

Key Laboratory of Semiconductor Material Science, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

Abstract To approach a high-efficiency, chip-size and widely tunable room temperature semiconductor terahertz (THz) frequency beating optical pumping beam source, an optical-integrated design is adopted. Two multiplied distribute feedback (DFB) semiconductor lasers and a multimode interference (MMI) coupler are monolithically integrated on InP based substrate for terahertz frequency beating optical pumping beam generation. The designed Bragg wavelength spacing of the two DFBs is 4.8 nm (0.6 THz). The Bragg wavelength of the two DFBs can be tuned by the injected current. Each of them can red-shift by 3.9 nm. The output THz beating optical beam of the optical-integrated chip can be coupled into the frequency resolved optical gate (FROG) through single mode fiber. By changing the injected current of the DFBs, room temperature THz frequency beating optical pumping beam source with a tunable frequency range of 0.184~1.02 THz is demonstrated.

Key words integrated optics; terahertz source; difference-frequency generation; frequency resolved optical gate; distribute feedback semiconductor laser; multimode interference coupler

OCIS codes 130.3120; 040.2235; 130.5990; 140.3620

1 引言

太赫兹(THz, 1 THz=10¹² Hz)波是指频率为0.1~10.0 THz的电磁波,其波段位于电磁波谱中毫米波和红外波之间(30 μm~3 mm)^[1]。与发展成熟的毫米波和远红外光技术相比,THz波的产生和检测技术研发相对滞后,导致人们对THz波段的认识依然有限,THz波也未得到充分的研究和应用。因此,在电磁波谱中这一波段也称为“THz鸿沟(THz Gap)”。随着研究的深入,THz波在物理、化学、生命科学、成像、安全检查、产品检测、通信等领域都有十分重要的研究价值和应用前景^[2-6]。

收稿日期: 2015-02-15; 收到修改稿日期: 2015-03-15; 网络出版日期: 2015-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(61274046, 61335009, 61201103, 61320106013)

作者简介: 孙梦蝶(1991—),女,硕士研究生,主要从事针对光纤通信和光网络的基于InP的光子集成芯片方面的研究。

E-mail: mdsun@semi.ac.cn

导师简介: 吉晨(1972—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事光子集成芯片、大功率激光器以及光电子芯片产业化成果转化工作等方面的研究。E-mail: chenji@semi.ac.cn(通信联系人)

目前,THz技术广泛应用的前提是实现便携式、低成本、可靠性高的THz光源。基于光学差频原理产生THz的方法具有连续可调、结构紧凑、可室温运行和便于操作等优点。Namje Kim等^[7]将两个分布反馈(DFB)激光器串联,制作了工作在1550 nm波段的双模激光器,利用低温生长的钢钾砷(InGaAs)光混频器,产生了在0.26~1.07 THz范围内可连续调谐的THz波。Lianping Hou等^[8]设计出了横向耦合双光栅DFB激光器,产生了频率为0.82 THz的拍频THz信号。杨清等^[9]等报道了可用于产生窄带THz波的超大差频双纵模Nd:YVO₄激光器,实现了差频在0.1~0.2 THz范围内的调谐。目前国内有很多科研工作者和机构对THz源^[9-11]进行了研究,但是关于单片集成室温连续可调的THz拍频抽运光源的报道还很少。本文通过理论计算和软件模拟,设计了基于差频法的集成THz拍频抽运光源芯片的结构参数,理论上该集成芯片可以在0.1~1.1 THz范围内室温连续工作。同时对芯片进行实验测试,得到的室温连续工作频率范围与理论设计基本相符。

2 基于差频法的双波长DFB拍频太赫兹源设计

器件设计原理如图1(a)所示。将两个并联的DFB激光器与无源MMI耦合器单片集成,拍频光从MMI端的波导输出。图1(b)为所讨论的器件显微镜照片。在工艺方面,采用对接生长技术实现磷化铟(InP)基的有源与无源集成。两个DFB的光栅区采用电子束的方法写出两个不同的光栅周期 Λ_1 和 Λ_2 ,分别对应两个DFB激光器的波长 $\lambda_1 = 2N_{\text{eff}}\Lambda_1$ 和 $\lambda_2 = 2N_{\text{eff}}\Lambda_2$ 。通过改变集成器件DFB区的注入电流对DFB激光器的工作波长进行调谐。调谐注入电流改变了有源区PN结的温度,进而改变材料折射率,最终改变激光器的工作波长。并联DFB方案采用对称结构设计,便于对两个DFB波长进行独立调谐,具有调谐控制简单,两通道串扰小等优点。

利用光学差频原理,THz的频率 ν_{THz} 由两个并联DFB的频率 ν_1 和 ν_2 决定(假设 $\nu_1 > \nu_2$),即 $\nu_{\text{THz}} = \nu_1 - \nu_2$ ^[12],相应的波长间隔与频率间隔的关系近似满足关系式 $\Delta\lambda = \Delta\nu\lambda^2/c$ ($\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$)。将两个DFB区的光栅布拉格波长设计偏调4.8 nm(对应的差频频率为0.6 THz)。在前期实验中,相同结构的DFB,通过改变其注入电流,至少能获得3.9 nm的波长偏调。因此,此方案预期可得到0.1~1.1 THz(对应波长差为0.9~8.7 nm范围内室温连续工作的THz拍频抽运光集成芯片。

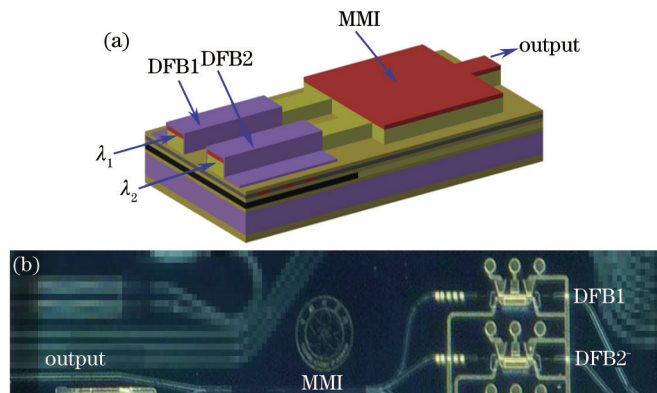


图1 单片集成双模半导体激光器基本结构。(a) 器件原理图; (b) 器件照片

Fig.1 Basic structure of monolithic dual-mode semiconductor laser. (a) Schematic of device; (b) photograph of device

3 实验结果与分析

3.1 光谱特性分析

实验采用高分辨率的光谱仪(型号 Advantest Q8384)对两个DFB在不同注入电流下的光谱特性进行了测试。图2(a)所示为注入电流都为25 mA,控温在25 °C时分别从DFB1和DFB2背端测试的光谱图,两个DFB的波长分别为1555.36 nm和1560.28 nm,波长差为4.92 nm,对应的差频频率为0.61 THz。

通过改变每个DFB区的注入电流,就可以改变DFB激光器的工作,从而得到不同的差频频率。图2(b)所示为两个DFB区峰值波长与注入电流的关系曲线,可以看到,随着注入电流的增加,两DFB的峰值波长不断红移。DFB1区注入电流从10 mA增加到100 mA,可以获得3.9 nm的波长偏调,进一步增加DFB1的注入电流,有望实现更大范围的波长偏调。以上结果,证实了所谈论的器件的室温连续调谐的特性。

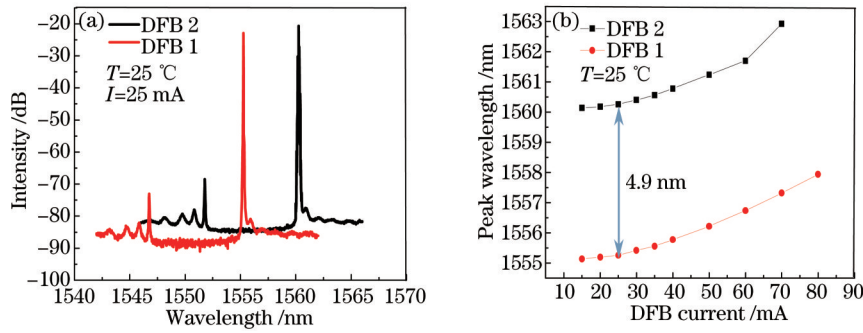


图2 光谱特性曲线。(a) DFB 光谱图($I_{DFB1}=I_{DFB2}=25$ mA); (b) DFB 峰值波长与注入电流的关系

Fig.2 Spectral characteristic curve. (a) Spectrum of DFBs when ($I_{DFB1}=I_{DFB2}=25$ mA); (b) relationship between peak wavelength of two DFBs and injected current

3.2 频率分辨光学门测试差频结果与分析

拍频空间光包络验证实验系统如图3所示。图3(a)为差频产生THz抽运光实验测试平台,图3(b)为整体测试系统框图。采用图1所示的集成芯片输出的双波长源作为THz拍频抽运光源信号,经掺饵光纤放大器(EDFA)进行功率放大后,采用1:9的光分束器分成两路,一路输入到光谱仪中进行光谱的测试和监控,一路经偏振控制器(PC)后输入到频率分辨光学门(FROG)中进行拍频空间光包络验证测试。

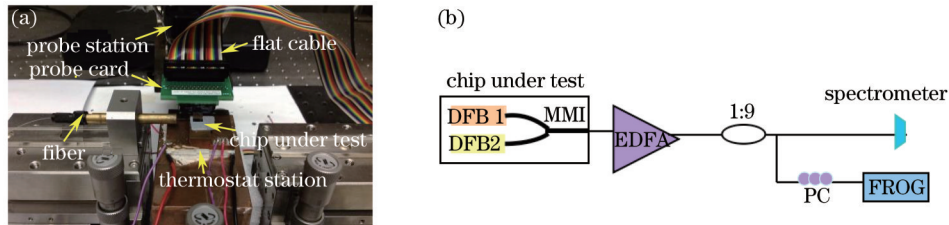


图3 差频产生THz抽运光实验系统。(a) 测试系统整体视图; (b) 实验框图

Fig.3 Experimental setup for THz pumping source based on difference frequency.

(a) General view of test setup; (b) experimental diagram

实验采用1550 nm FROG(型号HR 150)测试集成芯片的拍频包络信号。FROG测量到的最低差频频率和最高差频频率分别为0.184 THz和1.02 THz,即有效THz拍频抽运光束频率连续调谐范围为0.184~1.02 THz。图4所示为FROG探测到的自相关脉冲序列,脉冲序列周期为2 ps,相应的重复频率为0.5 THz,此时两DFB纵模波长间隔为4.0 nm,二者的结果是一致的。通过改变两DFB区的注入电流,可以得到0.184~1.02 THz范围内的任意自相关脉冲序列。由此证实了光子集成拍频THz抽运光源芯片能够满足室温下0.184~1.02 THz频率范围内的连续调谐。

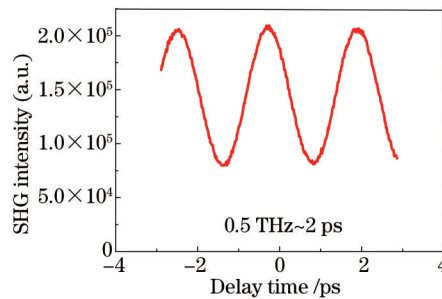


图4 FROG 探测到的自相关脉冲序列($f=0.5$ THz)

Fig.4 Autocorrelation pulse train measured by FROG ($f=0.5$ THz)

测试结果与预期设计比较会发现,实际测量到的频率调谐范围比预期设计的稍小,这主要是因为,在测试过程中,两DFB区注入电流相差太大时,两波长的功率不均衡,得到的拍频信号质量并不理想。后续实验将对这个问题进行进一步深入研究。

4 结 论

提出了一种采用半导体光子集成技术产生 THz 拍频抽运光束的方案。通过改变集成芯片中两 DFB 区的注入电流实现了室温下 0.184~1.02 THz 频率范围内的连续调谐差频 THz 拍频光包络,证实了该方案的可行性。下一步将在该方案的基础上,进一步改进器件结构,增加功率均衡等,有望实现更宽的调谐范围。此方案为利用光子集成方法实现高效率、可调谐、小型化、室温下稳定运转的 THz 波源展示了广阔的前景。

参 考 文 献

- 1 Xu Jingzhou, Zhang Xicheng. Terahertz Science and Technology and Application[M]. Beijing: Peking University Press, 2007: 1-20.
许景周, 张希成. 太赫兹科学技术与应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007: 1-20.
- 2 Zhiyong Tan, Li Gu, Tianhong Xu, *et al.*. Real-time reflection imaging with terahertz camera and quantum-cascade laser[J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(7): 070401.
- 3 Zheng Xianhua, Wang Xinke, Sun Wenfeng, *et al.*. Developments and applications of the terahertz digital holography [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209003.
郑显华, 王新柯, 孙文峰, 等. 太赫兹数字全息术的研发与应用[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209003.
- 4 Li Qi, Hu Jiaqi, Li Yunda, *et al.*. Autofocusing research on terahertz Gabor inline digital holography[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s1): s111001.
李 琦, 胡佳琦, 李运达, 等. 太赫兹伽栢同轴数字全息自动聚焦研究[J]. 光学学报, 2014, 34(s1): s111001.
- 5 Qingzhao Wu, Li Gu, Zhiyong Tan, *et al.*. Detection of a directly modulated terahertz light with quantum-well photodetector [J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(12): 120401.
- 6 Zhang Jingshui, Zhu Weiwen, Zhao Yuejin, *et al.*. Passive THz imaging system based on the crank-rocker mechanism[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1211006.
张镜水, 朱维文, 赵跃进, 等. 基于曲柄摇杆机构的被动太赫兹波成像系统[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1211006.
- 7 Kim N, Han SP, Ko H, *et al.*. Tunable CW THz generation detection with compact 1.55 mm detuned dual mode laser diode and InGaAs based photomixer[J]. Opt Express, 2011, 19(16): 15397-15403.
- 8 Lianping Hou, Mohsin Haji, Iain Eddie, *et al.*. Laterally coupled dual-grating distributed feedback lasers for generating mode-beat terahertz signals[J]. Opt Lett, 2015, 40 (2): 182-185.
- 9 Yang Qing, Huo Yujing, Duan Yusheng, *et al.*. Double-longitudinal-mode continuous-wave laser with ultra-large frequency difference used for narrowband terahertz-wave generation[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0514002.
杨 清, 霍玉晶, 段玉生, 等. 用于产生窄带太赫兹波的超大频差双纵模连续激光器[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0514002.
- 10 Yating Zhou, Jie Hou, Xiangfei Chen, *et al.*. Dual current injection tunable SBG semiconductor laser with asymmetric π equivalent phase shift[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2013, 55(3): 692 - 696.
- 11 Junqi Liu, Jianyan Chen, Tao Wang, *et al.*. High efficiency and high power continuous-wave semiconductor terahertz lasers at 3.1 THz[J]. Solid-State Electronics, 2013, 81: 68-71.
- 12 Qin Xuefei. The Investigation of Mid-Infrared Difference Frequency Laser Generation Based on PPLN Crystal[D]. Jinhua: Zhejiang Norma University, 2013: 1-2.
秦雪飞. 基于 PPLN 晶体的中红外差频激光技术研究[D]. 金华: 浙江师范大学, 2013: 1-2.

栏目编辑: 韩 峰