

基于偏振调节的太赫兹量子级联激光器双光梳研究

杨思嘉^{1,2}, 李子平^{1,2}, 廖小瑜^{1,2}, 王晨捷^{1,2}, 黎华^{1,2*}, 曹俊诚^{1,2*}

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 太赫兹固态技术实验室, 上海 200050;
2. 中国科学院大学 光电子学材料研究中心, 北京 100083)

摘要: 太赫兹量子级联激光器 (THz QCL) 双光梳在光谱检测、测距、成像等领域具有重要应用。双光梳信号严重依赖 THz 耦合光功率。利用 THz QCL 激光光为线偏振光的特性, 在双光梳光路上插入线偏振片, 通过旋转偏振片以达到对 THz 光强进行调节的作用。系统研究了 THz QCL 双光梳谱和功率与偏振角度的依赖关系, 为实现高稳定 THz 双光梳光源与应用奠定基础。

关键词: 太赫兹; 量子级联激光器; 双光梳; 偏振
中图分类号: O43 **文献标识码:** A

Study of dual-comb terahertz quantum cascade lasers based on polarization modulation

YANG Si-Jia^{1,2}, LI Zi-Ping^{1,2}, LIAO Xiao-Yu^{1,2}, WANG Chen-Jie^{1,2}, LI Hua^{1,2*}, CAO Jun-Cheng^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Terahertz Solid State Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Shanghai 200050, China;
2. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Dual-comb realized by terahertz quantum cascade lasers (THz QCL) has important applications in spectral detection, distance measurement and imaging. The dual-comb signal is heavily dependent on the THz coupling optical power. The THz QCL light is linearly polarized, and a linear polarizer is inserted into the optical path of the dual-comb. The polarizer is rotated to achieve the effect of adjusting the THz light intensity. The dependence of the THz QCL dual-comb spectrum and power on the polarization angle is systematically investigated and it lays the foundation for the realization of a highly stable THz dual-comb light source and application.

Key words: terahertz, quantum cascade laser, dual-comb, polarization

引言

光频梳 (Optical Frequency Comb, OFC) 是一种在频域由一系列等间距分布且相位关系确定的频率线组成的宽带相干光源^[1]。由于其时间和频率的高稳定性, 光频梳技术是一种高精度计量手段, 在天文学^[2]、原子钟^[3]、距离测量^[4]、光学传感^[5]、频率测量和分子光谱学^[6]等领域有重要的应用价值。基于光频梳的原理, 衍生出了其它光谱学方面的新型技术。其中双光梳^[7]就是光频梳的延伸技术之一。

双光梳由两个重复频率具有细小差别的光频梳组成。光波段的两个光频梳经多外差混频, 可将光波段的光谱信息下转换到微波段, 从而实现高分辨测量。光频梳与双光梳技术在近红外波段已日趋成熟, 并在光谱检测、成像、测距、通信等领域实现了应用^[8]。而在太赫兹 (THz) 波段, 由于缺乏高精度 THz 光源, THz 光频梳还处于启蒙阶段。基于半导体多量子阱结构的电泵浦 THz 量子级联激光器 (Quantum Cascade Laser, QCL)^[9], 由于其大功率输

收稿日期: 2022-06-13, 修回日期: 2022-08-13
基金项目: 国家自然科学基金 (61927813)

Received date: 2022-06-13, revised date: 2022-08-13

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61927813)

作者简介 (Biography): 杨思嘉 (1994—), 男, 在读博士生。主要研究方向为太赫兹半导体器件与应用。E-mail: sjyang@mail.sim.ac.cn

* 通讯作者 (Corresponding authors): E-mail: hua.li@mail.sim.ac.cn; jccao@mail.sim.ac.cn

出、高光束质量、频率覆盖范围^[10, 11]广等优点,是1~5 THz频段最高效的THz辐射源之一,也是产生THz光频梳的理想载体。

半导体激光器产生光频梳主要是通过四波混频——一种三阶光学非线性效应。当至少两种不同频率的光在同一非线性介质中传播时,就有可能产生四波混频效应。在激光器有源区中电子子带间跃迁的共振激发进行四波混频的结果^[12]。然而,要实现宽带、高频率稳定性的THz QCL激光光频梳,仅仅依靠四波混频是不够的。通常,人们可以通过激光器群速度色散调控^[13]、主动和被动稳频等技术^[14, 15]来进一步扩展光频梳频率覆盖范围、降低相位噪声、提高频率稳定性。

不同于单光梳,双光梳是通过两个在发光范围有重叠的单光梳,它们频域上相邻模式之间差频下转换的方式产生的。从理论上而言,两个光频梳里面的任意两种模式都可以通过拍频来产生双光梳信号。但在实际上由于在环境中存在噪声等因素,与频域上相距越远的模式拍频时,功率会越来越小,模式不断被抑制。如果可以证明双光梳光谱的每个模式之间是等间隔的,那么意味着这两个光频梳也具有基本等间隔的频梳线^[16]。

值得注意的一点,在实际的光耦合过程中,两个光频梳的耦合功率过大,会产生光注入锁定,导致两个光频梳具有相同的重复频率,无法形成双光梳^[17]。本文通过引入偏振,对双光梳的光耦合强度进行调节,系统研究了THz QCL双光梳谱和功率与偏振角度(耦合光功率)的依赖关系。

1 THz QCL双光梳实验装置

本工作在双光梳光路中插入线性偏振片,调节其中一个THz QCL光频梳(下文中称为Comb1)产生的光子进入另一个THz QCL光频梳(探测光频梳,下文中称Comb2)的功率,以达到对双光梳耦合功率调节的目的。THz QCL双光梳实验装置示意图如图1所示。其中Comb1和Comb2均为THz QCL器件,两个器件尺寸均为6 mm激光腔长和150 μm 脊条宽度。Comb1和Comb2之间放置一个线偏振片,通过对偏振片的偏振角度调节,以达到对Comb1的出射光的强度的调节作用。通过电驱动Comb1,使用Comb1发射出THz光,发出的光在通过偏振片的调节作用,被Comb2接收。同时,对Comb2也加载电驱动,使其也产生一个频率范围与Comb1接近的光频梳输出信号。此时,在Comb2中,两个光频梳信号进行多外差拍频作用,产生双光梳信号。该双光梳信号位于微波频段。在本实验中,该双光梳信号采用Comb2作为探测器进行测量。Comb2输出的双光梳信号通过一个T型偏置器(Bias-T)和一个微波信号放大器,最后再由频谱分析仪读取并显示该信号。本实验中使用的Bias-T的带宽为45 GHz。

本实验中所使用的THz QCL器件基于GaAs/Al-GaAs多量子阱材料,采用杂化有源区设计,即束缚态到连续态跃迁与共振声子结构。其中束缚态到连续态跃迁结构用于辐射跃迁,产生THz光子;而共振声子结构用于快速抽取下激光器能级电子,从而更有利于实现粒子数发展和大的激光增益。具体的有源区结构参数见文献^[18]。该有源区结构采用分子束外延方法生长在半绝缘GaAs衬底之上。生

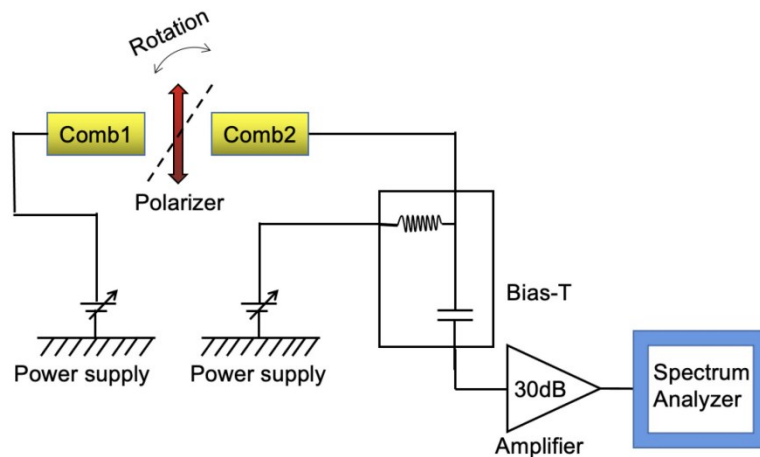


图1 THz QCL双光梳实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the THz QCL dual-comb experimental setup

长完成的 THz QCL 有源区结构采用传统半导体激光器工艺技术,如光刻、刻蚀、电子束蒸发、热退火等,制作成半绝缘表面等离子波导结构。最后,6 mm 的法布里-珀罗腔 THz QCL 芯片采用高导热的铜焊接在铜热沉上,用于导热和器件测试。器件的工作频率为 4.2 THz。

2 偏振片透射率与双光梳实验结果与分析

2.1 偏振片透射率测试结果

在进行 THz QCL 双光梳测量之前,我们首先采用傅里叶变换光谱仪对实验中所使用的偏振片的 THz 光谱特性进行了表征。由于光谱仪的光源所发射出来的光是宽谱非相干光,其本身不具备偏振特性。所以为了更接近 THz QCL 所发射出来的线偏振光,在光源发射窗口处,我们放置一枚偏振片,使出射光的偏振方向固定。宽谱非相干光经由偏振方向固定的偏振片之后,会变成与偏振片偏振方向相同的偏振光。之后将线偏振光通过待测偏振片,测试不同偏振角度下透射光的强度。最后分析偏振片对经过其的线偏振光的影响。

图 2 为实验测量的 0~90° 偏振角度区间下的 THz 光谱。在 1.5~12 THz 频率范围内,随着偏振片偏振角度的变化,透射光的强度也随着变化。其中强度最高的光谱为背景信号,即没有放置待测偏振

片的光谱。这里的 0° 偏振角对应于两个偏振片的偏振方向完全平行的情况,而 90° 对应于两个偏振片的偏正方向垂直。当偏振角度从 0° 变化到 90° 时,我们可以明显看到在所有频点下,其光谱强度单调降低。这个现象完全符合预期。

为了进一步研究该偏振片在 THz QCL 工作频点(4.2 THz)的偏振行为,我们将图 2 中光谱数据在 4.2 THz 频点的信息提取出来,得到不同偏振角度下的透射率,如图 3 所示。图 3 中的透射率由公式(1)获得的:

$$T = \frac{I_T}{I_B}, \quad (1)$$

其中 I_T 是透过偏振片后的光线强度, I_B 是背景强度,即不放置待测偏振片时,所测得的光强。在 0°~360° 范围内,我们可以清晰地看到透射率与偏振角度的依赖关系显示出“8”字曲线。在 0° 和 180°,透射率取得最大值;而在 90° 和 270°,透射率最小。

图 3 的实验数据充分证明,我们所采用的偏振片在 4.2 THz 频点可以展现出良好的偏振角度依赖关系,从而实现 THz 光功率的调节。

2.2 偏振片调节双光梳耦合实验结果

再验证了偏正片的功能之后,我们进一步采用图 1 的实验装置进行 THz 双光梳测量。首先,在 0° 偏振角下,我们实验测量得到了图 4 所示的 Comb1

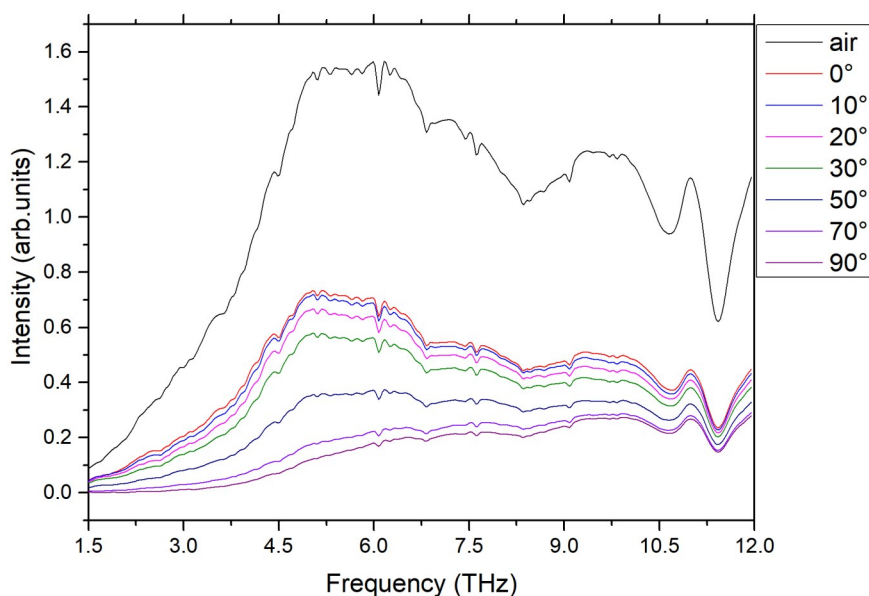


图 2 在 0 到 90° 偏振角度下测量得到的 1.5~12 THz 频率范围内偏振片的光谱。其中强度最高的光谱曲线是在没有放置偏振片条件下得到的,为背景信号

Fig. 2 Terahertz spectra of the polarizer measured when the rotation angle is varied from 0 to 90° in a frequency range between 1.5 and 12 THz. The spectrum with highest intensities is the background signal which was obtained without the polarizer

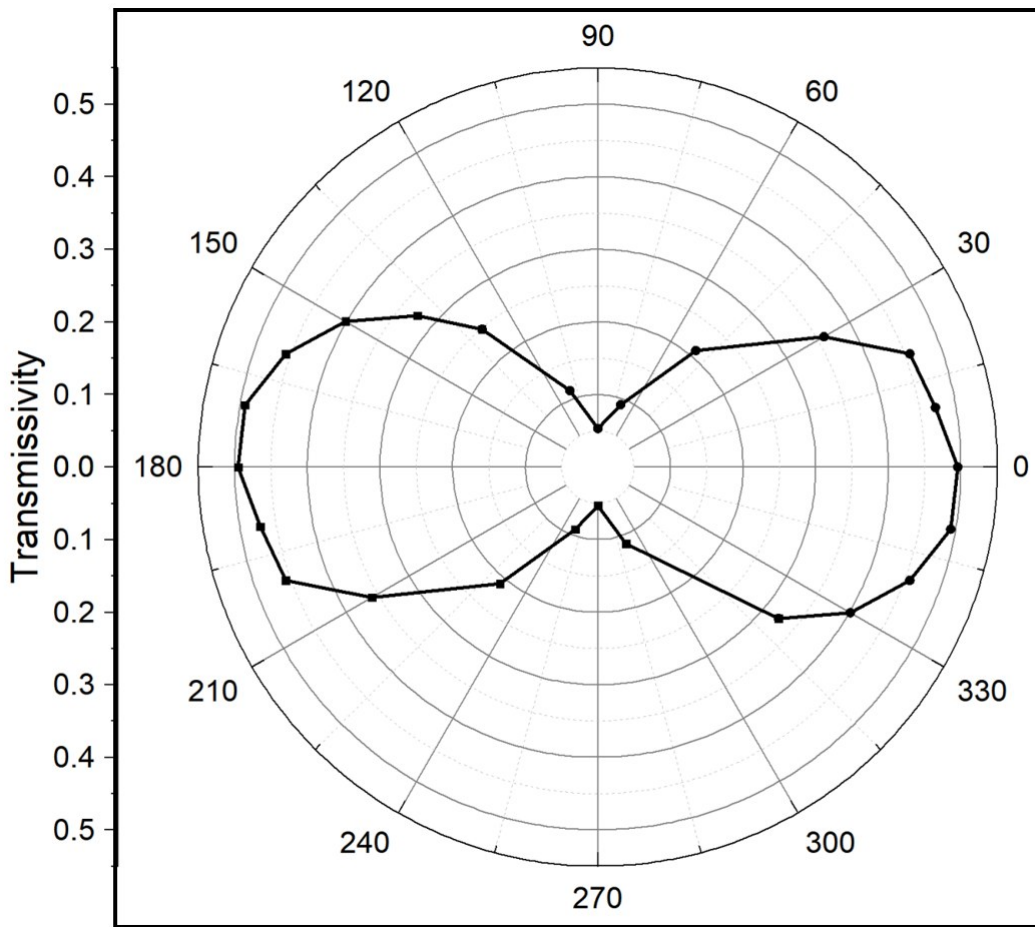


图3 极坐标下的偏振片透射率随偏振角度的依赖关系

Fig. 3 Polarization angle dependence of the measured transmission of the polarizer in polar coordinates

和 Comb2 的重复频率, 即 $f_{\text{rep}1}$ 和 $f_{\text{rep}2}$ 。THz QCL 光频梳的重复频率决定了相邻梳齿之间的间距, 其一般由器件的腔长决定。测试采用的分辨率带宽 (RBW) 为 20 kHz, 视频带宽 (VBW) 为 0.1 kHz。尽管我们实验中两个 THz QCL 的标称腔长均为 6 mm, 但是在实际器件中, 一般不同器件的腔长都存在细小差别。而且由于材料生长和器件工艺在精度上的局限性, 不同器件的折射率都会存在差别。因此, 尽管 Comb1 和 Comb2 的标称腔长相同, 两者的重复频率仍然存在差别。如图 4 所示, $f_{\text{rep}1}$ 和 $f_{\text{rep}2}$ 的频率相差 31.289 MHz。对于双光梳来说, $f_{\text{rep}1}$ 和 $f_{\text{rep}2}$ 不能相同, 否则无法在微波段得到双光梳信号。而 $f_{\text{rep}1}$ 和 $f_{\text{rep}2}$ 频率差正好等于双光梳信号的相邻模式频率间隔。因此图 4 的结果是产生 THz QCL 双光梳的前提条件。另外, 需要指出的是, 图 4 中, $f_{\text{rep}1}$ 和 $f_{\text{rep}2}$ 的信号强度差别接近 40 dB。这主要是因为在本实验中, 射频信号的测量是利用 Comb2 作为探测器来测量的, 所以 Comb2 自身的重复频率信号要比 Comb1

的重复频率强很多。

在测量得到 Comb1 和 Comb2 重复频率的基础上, 我们成功测量得到 THz QCL 双光梳信号。通过 Rohde-Schwarz 频谱分析仪对输入的双光梳信号分析处理。图 5a-d 为实验测量得到的四组双光梳信号, 对应的偏振角度分别为 0° , 20° , 40° , 60° 。实验采用的 RBW 为 1 MHz, VBW 为 500 Hz。当偏振角从 0° 改变到 60° 时, 我们可以观察到两个明显的现象。其一, 双光梳的功率逐渐降低, 这主要是由于改变偏振角度的时候, Comb1 发射的光子耦合进入 Comb2 的功率单调减小, 从而导致多外差混频双光梳信号逐渐变弱。另外一方面, 我们还可以清晰地观测到双光梳谱的间距发生了明显变化。这种变化主要是因为改变偏振角度的时候, Comb1 和 Comb2 的重复频率由于光反馈的变化而发生了变化。由于光频梳的测量是一种超高分辨的测量, 这种细微光反馈的影响最终都会传递到双光梳信号上。图 5 的实验结果也同时说明, 我们可以采用

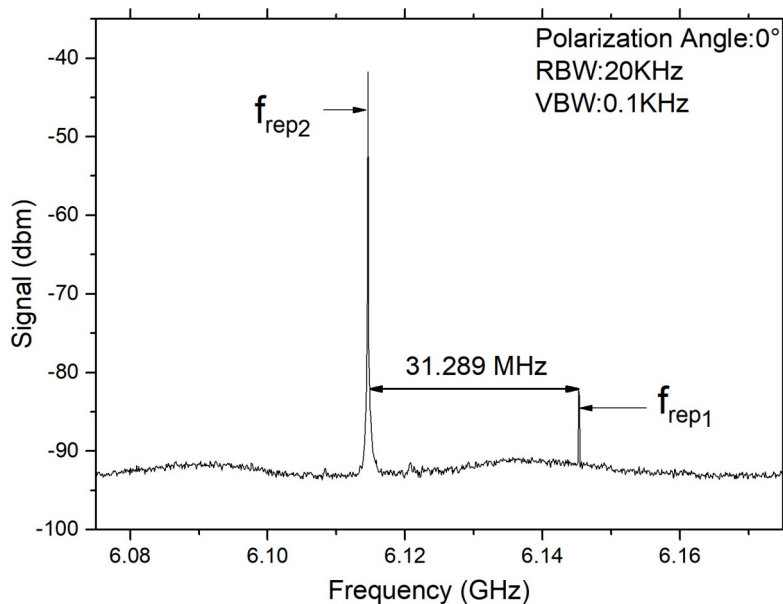


图4 偏转角度为 0° 时测量得到的Comb1和Comb2的重复频率

Fig. 4 Repetition frequencies of Comb1 and Comb2 measured with a polarization angle of 0°

微调光反馈的方法对THz QCL光频梳重复频率以及双光梳梳齿间距进行调谐。

为了全面揭示双光梳信号和偏振角度的关系,我们在图6中将双光梳功率与偏振角度的关系绘制

为极坐标图。图6中的功率值选取为在不同偏振角度下双光梳梳齿功率最高的一根的功率。与图3类似,图6中双光梳功率与偏振角度的依赖关系也显示为“8”字形曲线。当偏振角度为 0° 和 180° 时,由

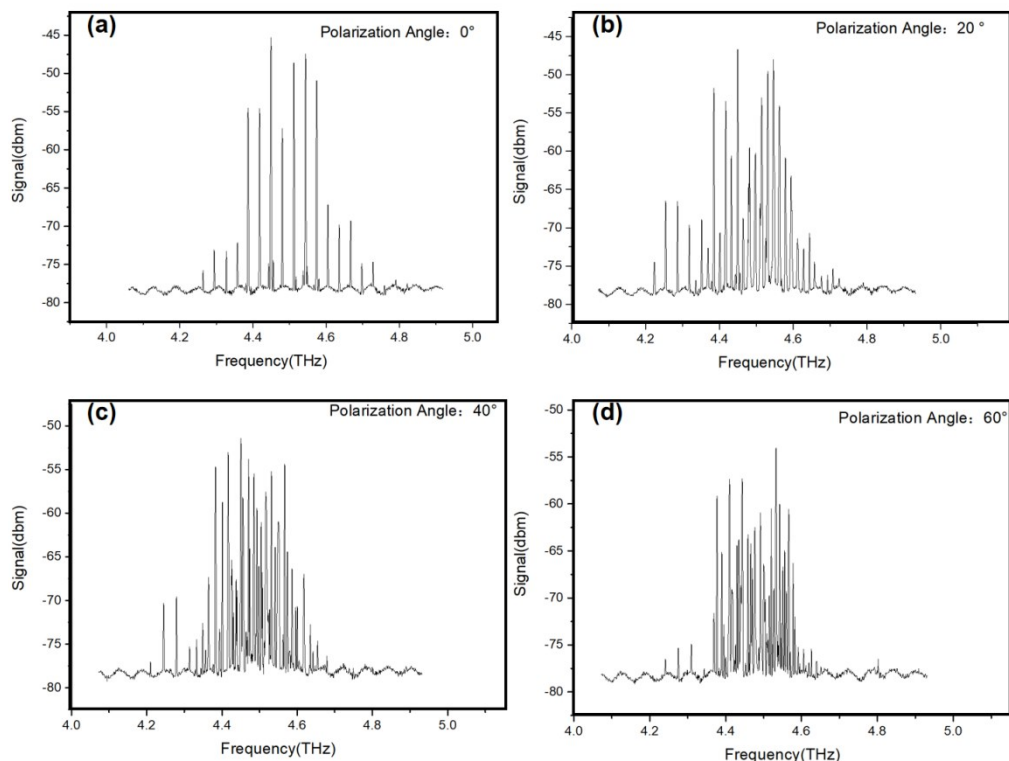


图5 偏振角度为 0° , 20° , 40° , 60° 时的双光梳谱

Fig. 5 Dual-comb spectra measured at 0° , 20° , 40° , 60° polarization angles

于 Comb1 耦合进入 Comb2(探测器)的功率最大,因此,双光梳功率也是最大;而当偏振角度为 90° 和 270° 时,此时耦合进探测器的光功率最小,因此双光梳的功率也最弱。由此可见,在 THz QCL 双光梳中,双光梳的信号功率主要取决于两个 THz QCL 光频梳的耦合功率。由于双光梳信号的产生是一个非线性的多外差混频过程,所以双光梳功率与 THz 耦合功率(或者偏振角度)并不是线性关系。在实际应用中,我们可以根据需求,选择合适的耦合功率(偏振角度),保证在尽可能大的双光梳功率的基础上,实现更稳定的、重复频率满足需求的工作模式。

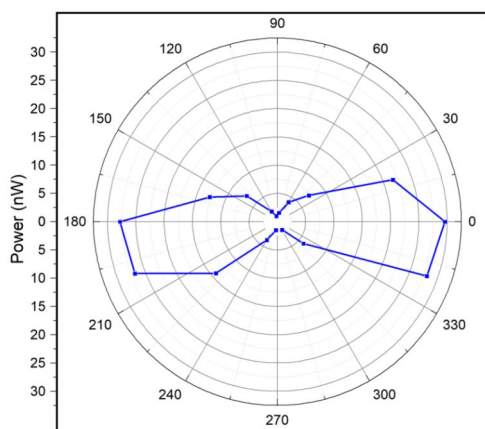


图6 极坐标下的双光梳信号功率与偏振片旋转角度的关系
Fig. 6 Dual-comb signal power in polar coordinates as a function of polarization angle

3 总结

本论文通过调节两个 THz QCL 光频梳之间线偏振片的角度,逐步改变 THz 光耦合效率,研究了 THz 耦合功率对 THz QCL 双光梳谱和功率的影响。实验结果表明 THz QCL 双光梳谱和功率与偏振角度(耦合功率)强相关。在偏振角度为 0° 和 180° 时,双光梳功率最大;而偏振角度为 90° 和 270° 时,由于耦合功率最小,双光梳功率也最弱。该实验结果同时还指出,微弱的光反馈会可以作为一种工具用于实现 THz QCL 的重复频率和双光梳梳齿间距的精细调节。本工作为实现高稳定 THz QCL 双光梳以及双光梳精细调节提供了实验基础。

References

[1] Hänsch T W. Nobel Lecture: Passion for precision [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, **78**(4): 1297–309.

- [2] Pröbster B J, Lezius M, Mandel O, *et al.* FOKUS II—Space flight of a compact and vacuum compatible dual frequency comb system [J]. *J Opt Soc Am B*, 2021, **38**(3): 932–9.
- [3] Ye J, Schnatz H, Hollberg L W. Optical frequency combs: from frequency metrology to optical phase control [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2003, **9**(4): 1041–58.
- [4] Hei K, Anandarajah K, Martin E P, *et al.* Absolute distance measurement with a gain-switched dual optical frequency comb [J]. *Opt Express*, 2021, **29**(6): 8108–16.
- [5] Xu K, Zhao X, Wang Z, *et al.* Multipass-assisted dual-comb gas sensor for multi-species detection using a free-running fiber laser [J]. *Applied Physics B*, 2020, **126**(3): 1–6.
- [6] Coddington I, Newbury N, Swann W. Dual-comb spectroscopy [J]. *Optica*, 2016, **3**(4): 414–26.
- [7] Bernhardt B, Ozawa A, Jacquet P, *et al.* Cavity-enhanced dual-comb spectroscopy [J]. *Nat Photonics*, 2010, **4**(1): 55–7.
- [8] Chang L, Liu S, Bowers J E. Integrated optical frequency comb technologies [J]. *Nat Photonics*, 2022, **16**(2): 95–108.
- [9] Williams S B S. Terahertz quantum cascade. [J]. *Nature Photonics*, September 2007, **1**(8).
- [10] Nakanishi A, Hayashi S, Satozono H, *et al.* Spectroscopic Imaging with an Ultra-Broadband (1–4 THz) Compact Terahertz Difference-Frequency Generation Source [J]. *Electronics*, 2021, **10**(3): 336.
- [11] Khalatpour A, Paulsen A K, Deimert C, *et al.* High-power portable terahertz laser systems [J]. 2021, **15**(1): 16–20.
- [12] Li H, Laffaille P, Gacemi D, *et al.* Dynamics of ultra-broadband terahertz quantum cascade lasers for comb operation [J]. *Optics express*, 2015, **23**(26): 33270–94.
- [13] Burghoff D, Kao T-Y, Han N, *et al.* Terahertz laser frequency combs [J]. *Nat Photonics*, 2014, **8**(6): 462–7.
- [14] Bachmann D, Rösch M, Süess M J, *et al.* Short pulse generation and mode control of broadband terahertz quantum cascade lasers [J]. *Optica*, 2016, **3**(10): 1087–94.
- [15] Wang F, Pistore V, Riesch M, *et al.* Ultrafast response of harmonic modelocked THz lasers [J]. *Light: Science*, 2020, **9**(1): 1–8.
- [16] Liao Xiao-Yu, Cao Jun-Cheng, Li Hua. Research progress of terahertz semiconductor optical frequency combs [J]. *Acta Phys. Sin.*, (廖小瑜, 曹俊诚, 黎华. 太赫兹半导体激光光频梳研究进展, 物理学报) 2020, **69**(18): 146–60.
- [17] Li ZP, Wan WJ, Zhou K, *et al.* On-chip dual-comb source based on terahertz quantum cascade lasers under microwave double injection [J]. *Physical Review Applied*, 2019, **12**(4): 044068.
- [18] Wan WJ, Li H, Zhou T. Cao, JC. Homogeneous spectral spanning of terahertz semiconductor lasers with radio frequency modulation [J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 1–9.