

温度对可调谐半导体激光器输出波长的影响

韩俊杰, 王思云, 代元承诚, 赵延波, 伙安严, 黄刚*

武汉科技大学理学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2022年8月1日; 录用日期: 2022年8月31日; 发布日期: 2022年9月7日

摘要

可调谐半导体激光吸收光谱(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy)是一种能够在工业应用中实现对气体组分浓度和温度场甚至速度场测量的检测技术。在TDLAS检测技术中, 如何实现输出波长与待测气体吸收波长的精确校准是问题的关键。在本文中, 我们采用温度调谐来观察温度对输出波长产生的影响。在温度调节中, 温度的变化会引起腔体内部气体折射率的变化, 而折射率变化会影响内部光学系统, 使输出波长发生变化, 我们采用DFB激光器管芯(分布反馈激光器)作为发光芯片, 制作出了测量甲烷气体浓度的激光器。该激光器内部温度每上升1°C, 波长向长波方向漂移0.1 nm, 每降低1°C, 中心波长向短波方向增加0.1 nm。

关键词

TDLAS, 分布式反馈激光器, 温度控制, 波长

Effect of Temperature on the Output Wavelength of a Tunable Semiconductor Laser

Junjie Han, Siyun Wang, Yuanchengcheng Dai, Yanbo Zhao, Anyan Huo, Gang Huang*

College of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Received: Aug. 1st, 2022; accepted: Aug. 31st, 2022; published: Sep. 7th, 2022

Abstract

Tunable semiconductor laser absorption spectroscopy (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy) is a detection technique that measures the gas component concentration and tempera-

*通讯作者。

文章引用: 韩俊杰, 王思云, 代元承诚, 赵延波, 伙安严, 黄刚. 温度对可调谐半导体激光器输出波长的影响[J]. 应用物理, 2022, 12(9): 497-502. DOI: 10.12677/app.2022.129058

ture field and even velocity field in industrial applications. In the TDLAS detection technology, how to realize the accurate calibration is the key to the problem. In this paper, we employ temperature tuning to observe the effect of temperature on the output wavelength production. In temperature regulation, the change of temperature will cause the change of the refractive index of the gas inside the cavity, and the change of the refractive index will affect the internal optical system and change the output wavelength. We use the DFB laser core (distribution feedback laser) as the light-emitting chip to make a laser to measure the concentration of methane gas. It is concluded that when the internal temperature of the laser rises by 1°C , the wavelength drifted by 0.1 nm in the long wave direction, and by 1°C decrease, the central wavelength was increased by 0.1 nm.

Keywords

TDLAS, DFB, Temperature Control, Wavelength

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

世界上每年有至少有数千人死于各种矿难事故，其中甲烷爆炸是导致矿难事故的一个重要原因，当矿洞中的甲烷气体达到危险浓度的时候就极易引起爆炸，精确测量甲烷气体浓度成为保证矿洞安全的关键之一。自美国科学家 Hinkley 和 Reid 从上世纪八十年代首次提出可调谐半导体激光吸收光谱(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy)技术以来，在过去三十多年时间里，TDLAS 技术得到了很大的发展，陆续被应用于痕量气体检测，矿洞甲烷气体浓度检测成为一个重要的应用领域[1] [2]。

TDLAS 技术主要是利用可调谐半导体激光器的窄线宽和波长随注入电流改变的特性，调制激光器的波长，使得可调谐激光器输出波长与被检测气体分子的吸收波长相符，使气体分子对被调制的激光进行吸收，基于朗伯比尔(Lambert-Beer)定律[3]，根据吸收量实现对气体分子浓度的测量[4]。对半导体激光器的注入电流或温度进行调控，实现对输出激光波长的细微调节，进而获取待测气体在一个周期内的单线吸收光谱曲线与扣除待测气体信息的背景吸收谱线，在调制光谱技术发展的基础上，与长光程吸收技术相结合，实现对气体痕量检测的目的。

2. 可调谐半导体激光器的基本原理和组成

激光器想要发出激光必须满足两个条件：有源区里产生足够的粒子数反转分布；在腔内存在着光学谐振，可以得到光功率放大的出射光。第一个条件需要有泵浦源的激励作用，由泵浦源进行电流注入实现粒子数反转。而第二个条件的光学谐振就有比较多的实现方式，腔体构造根据所需的波长而异，如 F-P 腔、Bragg 衍射光栅等[5]。

而对于半导体激光器，它的初始光源来源于导带和价带之间的自发辐射，采用双异质结结构可以更好地提高激光器的增益效率。常采用的短波段($0.85\ \mu\text{m}$)材料有 GaAs 和 GaAlAs，长波段($1.3\sim 1.55\ \mu\text{m}$)材料有 InGaAsP 和 InP。可调谐的特性是激光器的一个重要特性，在各项实验工作中，我们都需要实现波长的可调从而达到激光器的效率最大化，可调谐半导体激光器有两个主要部分，即增益区和腔体调谐区。腔体调谐的主要方法有三种：

- 1) 机械调节：即改变光路角度或腔体长度从而改变激光器的腔模，而腔模又直接控制着输出波长；

2) 温度调节: 温度的变化会引起腔体内部气体折射率的变化, 折射率变化会影响内部光学系统, 使输出波长发生变化;

3) 电流注入调节: 在调谐波谱范围内注入载流子改变载流子浓度, 从而改变输出波长。

我们可以通过这些调节设计精准波长激光器, 通过精准控制温度和电流实现固定腔体中精准波长激光的输出。

本论文的主要工作是探究温度调节对输出波长的影响, 中间测试气体为甲烷, 其中甲烷的特征吸收波长为 1653 nm [6]。

3. 实验材料及实验仪器

本论文实验工作的重要的实验仪器有: TEC 温控电路, 安捷伦色谱仪, 直流稳压电源。我们使用 TO 封装的 DFB 激光器(如图 1 所示), TO 封装的 DFB 激光器有六个管脚。利用温度可以调节 DFB 激光器的出光波长的特性, 在激光器电路中设计了 TEC 温控电路去调节激光器管芯温度[7], 成功制作出了利用温度对出光波长进行精准控制的 TO 封装的 DFB 激光器[8]。我们制备了 100 个激光器 TO 试样, 首先使用光功率计测量, 检测激光器输出光功率是否达到 10 mW 以上, 然后在准直仪上进行光束准直, 波长准直过程中, 我们需要调节准直仪上的两个机械旋钮以使出光孔能够和光束的最大出光口径吻合。我们将电流值设置为 40 mA, 电压值设置为 3 V, 温度精确控制在 25°C, 对样品进行测量, 测量过程中使用红外光挡光板对出光效果进行评价。要求 25°C 时发出激光的中心波长为 1653 nm, 最后从 100 支试样中选出功率和波长符合要求的试样 37 只。

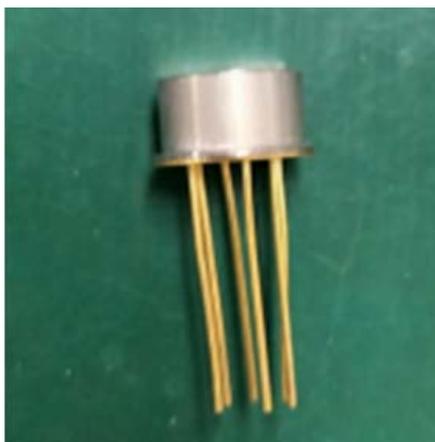


Figure 1. Laser TO physical picture

图 1. 激光器 TO 实物图

4. 实验结果与分析

4.1. 温度对波长的影响

光波长会受到温度的影响, 原因是温度会影响腔内介质的折射率, 当激光在腔内产生并受激放大时, 根据朗伯比尔定律, 光在腔内的增益是与腔长密切相关的, 腔内会有两束方向不同的激光束, 两光束会形成相长或相消干涉, 从而会在腔内形成驻波场, 为了产生稳定的驻波场, 谐振腔的长度必须是半波长的整数倍, 即:

$$L = \frac{m\lambda}{2} \quad (1)$$

根据式 $L = \frac{m\lambda}{2}$ 可知谐振腔内能形成稳定振荡放大的频率条件:

$$\lambda = \frac{2L}{m} \tag{2}$$

再根据式光在介质中传播速度公式以及波长公式 $v = \frac{c}{n}$, $f = \frac{v}{\lambda}$ 可以得到谐振频率

$$f = \frac{mc}{2nL} \tag{3}$$

式中 n 是谐振腔内介质的折射率, m 为正整数, L 是谐振腔的长度, 相邻纵模间的频率间隔是 $\Delta f = \frac{c}{2Ln}$, 由于温度能够影响内部的折射率, 所以根据式(3), 温度也影响着腔内的谐振频率。又因为光速 c 不变, 当温度不变时(折射率 n 也不变), 频率和输出波长之间满足的关系是

$$f \propto \frac{1}{\lambda} \tag{4}$$

从定性角度考虑, 一般情况下, 温度上升时气体折射率会下降, 根据式(2)和式(3)可以推出输出波长是增大的, 为了研究温度和输出波长的定量关系, 在实验中, 我们使用 25℃时波长为 1653 nm 样品进行实验, 运用控制变量法测量温度对激光器输出中心波长的影响进行测试, 温度在 10℃到 40℃之间选取, 步长为 1℃, 我们把电流控制在 40 mA, 精确调节温度测试。图 2 为实验中使用光谱仪测量得到的激光光谱线图, 其中顶峰 Peak 1653.24 nm 为此时测量得到的中心波长。



Figure 2. The spectral pattern measured in an experiment
图 2. 实验中测量得到的波谱图样

4.2. 实验结果

随机从筛选得到的中心波长 1653 nm (25℃)的样品中取 10 只进行实验, 通过 TEC 温控电路, 控制腔体内部的温度, 分别对这些样品测试。从 10℃到 40℃时输出的激光的中心波长, 得到的详细数据如表 1 所示。

我们使用 Matlab 的软件用最小二乘法将测量得到的温度和波长数据进行拟合, 得到样品的中心波长和测量温度之间的关系曲线如图 3 所示, 拟合曲线对应的方程为 $y = 0.1103x + 1650.5$, 相关度为 0.9939。

Table 1. Measurement results of sample center wavelength as a function of temperature

表 1. 试样中心波长随温度变化的测量结果

温度(°C)	10	11	12	13	14	15	16	17
平均中心波长(nm)	1651.30	1651.64	1651.78	1651.80	1652.00	1652.12	1652.30	1652.34
温度(°C)	18	19	20	21	22	23	24	25
平均中心波长(nm)	1652.46	1652.68	1652.80	1652.90	1653.02	1653.12	1653.23	1653.24
温度(°C)	26	27	28	29	30	31	32	33
平均中心波长(nm)	1653.36	1653.46	1653.56	1653.68	1653.78	1653.90	1654.00	1654.10
温度(°C)	34	35	36	37	38	39	40	/
平均中心波长(nm)	1654.20	1654.30	1654.42	1654.52	1654.63	1654.71	1654.82	/

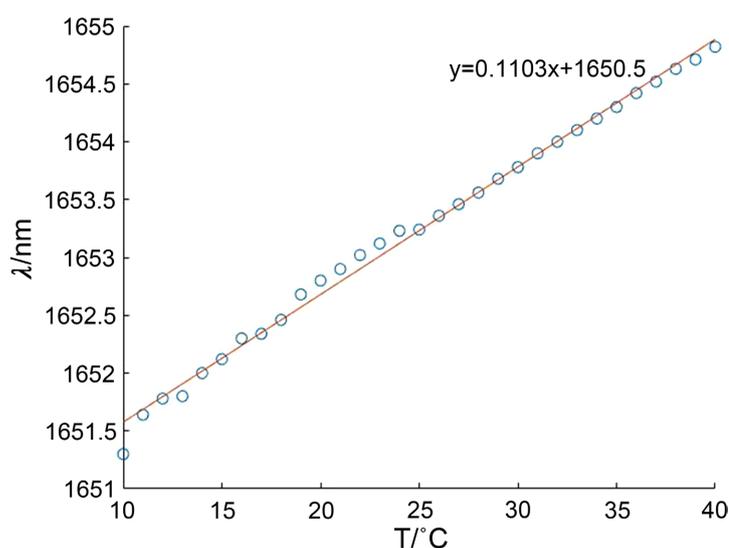


Figure 3. The central wavelength of the sample is plotted against the measured temperature

图 3. 样品的中心波长和测量温度的关系曲线

根据拟合曲线和方程可以看出, 激光器输出中心波长和温度的关系很符合线性规律, 温度每上升 1°C, 波长向长波方向漂移 0.1 nm, 每降低 1°C, 波长向短波方向漂移 0.1 nm。

5. 结论

我们研究了可调谐激光器输出中心波长 λ 与温度 T 的关系, 发现温度 T 每变化 1°C, 输出波长 λ 漂移 0.1 nm, 具有一定的线性关系, 符合公式 $\lambda = 0.11T + 1650.3 \text{ nm}$ 。

基金项目

1) 武汉科技大学重点项目“物理仿真实验教学与疫情时期的教学实践研究”; 2) 校级大创项目“TDALAS 可调谐半导体激光传感器”。

参考文献

- [1] Yang, H.N., Chen, J.J. and Luo, X. (2019) Leakage Detection of Closed Vials Based on Two-Line Water-Vapor TDLAS. *Measurement*, **135**, 413-417. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.11.090>
- [2] 宋芳. 中红外激光甲烷传感技术研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [3] Guo, X., Zheng, F., Li, C., *et al.* (2019) A Portable Sensor for *In-Situ* Measurement of Ammonia Based on Near-Infrared Laser Absorption Spectroscopy. *Optics and Lasers in Engineering*, **115**, 243-248. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.12.005>
- [4] 杨玉新, 刘海波, 等. 基于可调谐激光吸收光谱的痕量 CO 定量检测技术[J]. 工业安全与环保, 2019(1): 74-78.
- [5] 张国威, 王兆民. 激光光谱学原理与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1989: 135-140.
- [6] 叶年年, 冯若尘, 田思雨, 李冯双. 基于 TDLAS 的甲烷气体检测技术综述[J]. 内蒙古煤炭经济, 2019(12): 43-44, 98.
- [7] 高雪清, 童杏林. 基于 DFB 激光器的光纤光栅温度检测[J]. 光学与光电技术, 2015, 13(3): 23-24.
- [8] 赵梓涵. 808 nm 高功率半导体激光器封装技术研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2017: 10-20.