

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105945

DFB 半导体激光器电流波长调谐线性度分析与校准^{*}

白建胜 张丕状 戚俊成 贾宇杰 张 扬 牛瑞兴

(中北大学 信息探测与处理山西省重点实验室 太原 030000)

摘要: 分布反馈半导体激光器的调谐特性是制约 TDLAS(可调谐半导体激光吸收光谱)技术测量性能的因素之一。针对目前 DFB 激光器存在固有的波长调谐非线性问题,提出了基于多项式拟合电流预校准算法的调谐非线性校准方法。首先,搭建了激光器电流波长测量系统,实测了电流波长关系并对线性度进行分析,基于多项式拟合算法推导注入电流预校准数学模型。其次,分析了多项式拟合算法拟合效果,通过比较各阶拟合多项式的 MSE 值(均方误差)和收敛特性,选择了二次多项式作为校准函数。实验结果表明,相比未校准状态,基于多项式拟合电流预校准算法使校准后的 MSE 值有大幅度降低。其中,对较优的二次多项式拟合算法进行激光器调谐非线性误差分析,相比校准前 15.39%,校准后降低至 2.27%,验证了该校准方法能够大幅提高 DFB 半导体激光器电流波长调谐的线性度。

关键词: DFB 半导体激光器;调谐技术;多项式拟合算法;线性度分析;预校准

中图分类号: TN21;TN29 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Analysis and calibration of current wavelength tuning linearity of DFB semiconductor laser

Bai Jiansheng Zhang Pizhuang Qi Juncheng Jia Yujie Zhang Yang Niu Ruixing

(Shanxi Key Laboratory of Signal Capturing and Processing, North University of China, Taiyuan 030000, China)

Abstract: The tuning characteristics of diode lasers in TDLAS (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy) technology is one of the factors that restrict the measurement performance of the system. Aiming at the inherent wavelength tuning nonlinearity of current DFB lasers, a tuning nonlinearity calibration method based on polynomial fitting current pre-calibration algorithm was proposed. Firstly, the laser current wavelength measurement system was built, the current wavelength relationship was measured and the linearity was analyzed, and the injection current pre-calibration mathematical model was deduced based on polynomial fitting algorithm. Secondly, the fitting effect of polynomial fitting algorithm was analyzed. By comparing MSE value (mean square error) and convergence characteristics of each order fitting polynomial, quadratic polynomial was selected as calibration functions. Experimental results show that compared with the uncalibrated state, the pre-calibration algorithm based on polynomial fitting current greatly reduces the calibrated MSE value. Among them, the laser tuning nonlinear error analysis was performed on the better second-degree polynomial fitting algorithm. Compared with 15.39% before calibration, it was reduced to 2.27% after calibration, it was verified that the calibration method can greatly improve the linearity of current wavelength tuning of DFB semiconductor lasers.

Keywords: DFB semiconductor laser; tuning technology; polynomial fitting algorithm; linearity analysis; pre-calibration

0 引 言

DFB 半导体激光吸收光谱分析方法可实现温度场多组分同时测量,随着分布反馈半导体激光器的发展,体积小、功耗低、寿命长、线宽窄、波长可调谐等优点使其成为 TDLAS 系统的主要器件^[1-2]。在 TDLAS 温度测量系统

中,电流调谐特性的微弱变化直接影响到气体分子的光谱吸收位置和线型^[3-4],激光器的电流调谐特性是指激光器输出光谱特性随着调谐电流而发生改变,输出光谱特性直接影响到光谱吸收的位置、深度、线性和幅度等参数,波长调谐非线性导致的气体分子吸收线型失真,从而对测温的分辨率和精度产生影响^[2-3],因此希望 DFB 激光器电流波长

收稿日期:2021-03-12

^{*} 基金项目:山西省高等学校科技创新项目(2020L0274)、中北大学研究生科技基金项目(20201727)资助

调谐特性具有良好的线性。

传统的 DFB 激光器电流波长调谐线性度校准方法为闭环校准。闭环校准属于自动控制系统,包括光电实时动态反馈方法^[6]、鉴频比较法^[7]、延迟锁相法^[8]。其中光电实时动态反馈法通过动态实时控制激光器的输入电流对调频非线性进行校正,但是对激光器的线宽、控制环路带宽有较高的要求,同时对系统采样率有较高要求;鉴频比较法利用频率量为待校正的反馈量与标准信号频率对比,形成负反馈系统来补偿拍信号频率差,但是针对性较强、易用性差,无法从根源上纠正调谐非线性现象,且无法适用于其他激光光源;延迟锁相法将相位作为反馈量进行校正,与标准信号相位对比,通过实现拍信号与标准的参考信号相位跟踪同步的方法实现非线性的校正,用以实现更高精度的非线性校正,但是包含复杂数字和模拟电路的光电锁相电路会产生较高的相位噪声影响系统的传输性能,同时不同的延时间和频率会对拍信号的质量产生影响。

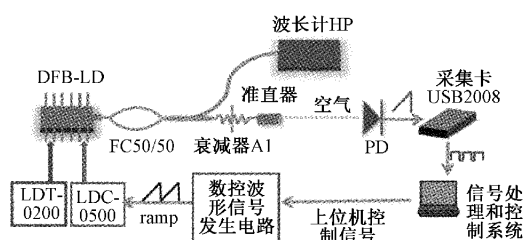
除此之外,开环校准的方式对 DFB 激光器电流波长调谐线性度校准的方法也有很多研究^[9-11]。通过在一定条件下稳定输入获得激光器相应的输出特性参数,通过相应的算法获得输入电流的校准模型对 DFB 激光器进行调谐,达到校正激光器输出波长信号非线性的目的。该方案具有如下优势:首先,使用开环校准方式可以简化实验系统,并且对多类型激光器出射波长线性度校准的适应性更强^[12-13];其次,相比闭环校准的校正算法复杂度,开环方式在激光器实测电流和波长数学关系的基础上反推电流驱动波形,再使用校准后的电流波形直接驱动激光器,算法复杂度较低且容易实现。高红^[14]对激光器注入电流和调谐时间以及波数之间的关系,得到激光器调谐相对波数与注入电流的关系,发现其非线性并进行了校准。但是开环校准若没有高精度的算法达不到高的线性度,不能满足某些对线性度要求较高的场合^[15],并且实验系统复杂,同时用于产生补偿激光器调谐非线性的信号发生器需要有很好的任意波形发生功能^[16]。

基于此,本文通过实验研究了 DFB 激光器电流波长调谐特性,当激光器工作温度恒定,采取注入恒定电流逐点测量波长方式得到注入电流和出射光波长之间关系,比较不同阶次的拟合校准效果,选择二次曲线拟合校准波形。结合数控波形信号产生电路控制电流波形和调谐时间之间的关系,产生电流校准波形用于补偿激光器波长调谐非线性。通过实验测量校准之后的电流波长调谐曲线,相比较前显著改善了 DFB 激光器波长调谐非线性。

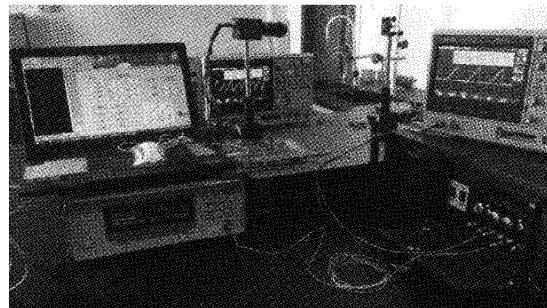
1 实验装置

DFB 半导体激光器电流波长调谐线性度分析实验系统结构如图 1 所示。该系统由激光控制模块、探测模块和信号处理模块 3 部分构成。在激光控制模块中,数控波形信号发生电路用于产生 500 Hz 的锯齿波调谐电流非线性校准波形叠加在电流驱动信号中,结合高精度电流控制器(LDT-

0200)和温度控制器(LDC-0050)控制激光源(tunable semiconductor laser,DFB-LD,NLKIE5GAAA)输出连续光,经过 10 dB 衰减器(attenuator,A1)、光纤耦合器(fiber coupler,FC)后分成两部分,一部分直接耦合到波长计(HEWLETT PACKARD-86120C,HP)用以测量出射波长,另一部分经过准直器通过开放光路(20 cm)射入窄带光子探测模块。窄带光子探测模块由带通滤光片(NB-1392-007nm ϕ 25.4 \times 1.0 mm)、光学镜头、光电二极管(FGA-10,THORLABS)、低噪声光电放大器(electronic amplifier,AD8672)构成,信号处理模块由数字示波器(oscilloscope,SIGLENT SDS-2102)、多通道高速采集卡(USB2088>CreateDevice)组成。通过激光控制模块为 1392nm-DFB 激光器提供低噪声偏置电流,并将温度稳定在 25 $^{\circ}$ C。



(a) 示意图



(b) 实验装置实物图

图 1 实验系统

通过数控波形信号发生电路以恒流方式(2 mA 为步长,电流变化范围为 10~120 mA),固定测试温度,中心波长为 1 392.185 nm,采用逐点测量的方法,改变激光器注入电流,通过波长计测得所用激光器波长,经过 10 次测量并对数据取平均值得到激光器静态的电流波长关系如图 2 所示。

从图 2 可以很明显的看出,随着调谐电流的线性变化,激光器输出波长变化量存在非线性。根据上面的分析,随调谐时间线性变化的电流信号,无法满足波长调谐线性,为了解决这个问题,提出了一种基于基于多项式拟合算法的调谐电流预校准数学模型方法。

2 基于多项式拟合算法的调谐电流预校准数学模型计算

对实验数据进行多项式拟合,分别包括线性、二次、三次、四次、五次曲线拟合,得到 $\lambda-I$ 曲线如图 3 所示。

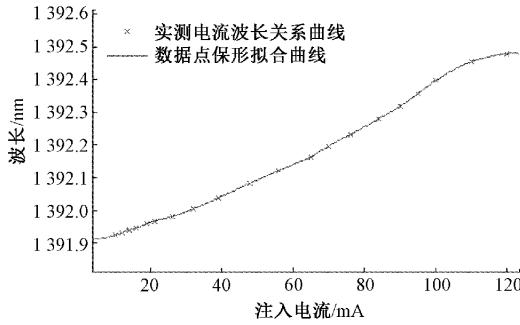
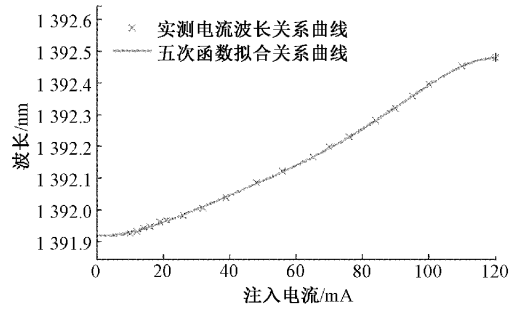
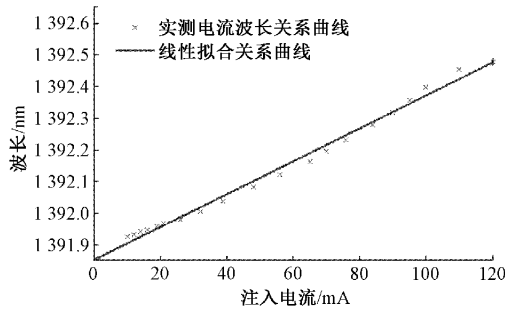


图 2 激光器静态的 $\lambda-I$ 关系

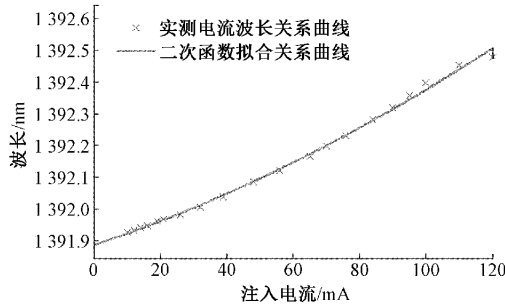


(e) 五次拟合曲线和原始数据对比

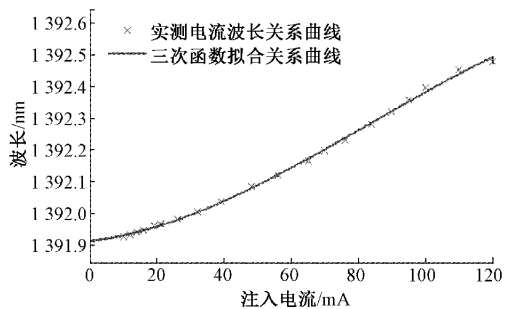
图 3 各阶多项式拟合曲线和原始数据对比



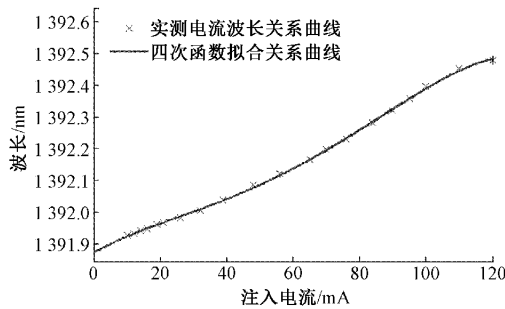
(a) 线性拟合曲线和原始数据对比



(b) 二次拟合曲线和原始数据对比



(c) 三次拟合曲线和原始数据对比



(d) 四次拟合曲线和原始数据对比

对一个电流周期内 $\lambda-I$ 曲线进行多项式拟合可以得到函数方程:

$$\lambda(I) = \theta_0 i^m + \theta_1 i^{m-1} + \theta_2 i^{m-2} + \dots + \theta_m i^0, m \geq 1 \quad (1)$$

式中:参数 $\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_m$ 是激光器的调谐系数,与激光器的类型、结构有关系,针对实验中用到的 DFB 激光器,在温度恒定实验条件下,调谐系数都是常数。通过对 $\lambda-I$ 曲线进行多项式拟合(包括线性、二次、三次、四次、五次)。通过图 3 分析可以得到各拟合模型的函数关系:

$$\begin{cases} \lambda_1(I) = 0.0052 \times i + 1391.8526 \\ \lambda_2(I) = (1.4e-5) \times i^2 + 0.0035 \times i + 1391.8551 \\ \lambda_3(I) = (-2.3e-7) \times i^3 + (5.7e-5) \times i^2 + 0.0012 \times i + 1391.9133 \\ \lambda_4(I) = (-6.6e-9) \times i^4 + (1.5e-6) \times i^3 - (8.8e-5) \times i^2 + 0.0058 \times i + 1391.8719 \\ \lambda_5(I) = (-1.6e-20) \times i^5 + (4.6e-8) \times i^4 - (4.6e-6) \times i^3 + 0.00023 \times i^2 - 0.002 \times i + 1391.928 \end{cases} \quad (2)$$

通过均方误差(MSE 值)对拟合模型得到的数据和实测数据进行误差比较,MSE 值越小代表拟合效果越好。原始数据点包含 20 组电流波长数据,计算方程如式(3)所示。

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^m (\lambda_i(I) - \hat{\lambda}_i(I))^2}{20} \quad (3)$$

式中: $\lambda_i(I)$ 表示实测电流波长数据点, $\hat{\lambda}_i(I)$ 表示式(2)拟合模型的函数计算得到的电流波长数据点,计算多项式函数(线性、二次、三次、四次、五次)的 MSE 值比较不同阶次的拟合效果。

分析图 4,从低阶(线性)到高阶(五次)拟合,对实测电流波长数据的拟合度越来越好。

分析图 3(a),线性拟合得到一条直线,该直线并不能很好的拟合实测数据,结合不同阶次 MSE 值分布的高均方误差值可以得出线性回归为欠拟合(高偏差);五次函数

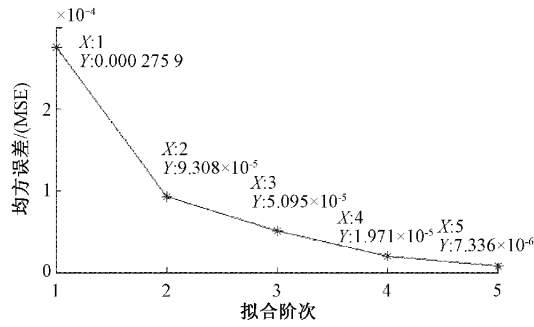


图 4 不同阶次拟合数据的 MSE 值

属于高阶拟合,拟合过程函数过于庞大而产生了过多参数($\theta_0 \sim \theta_5$),拟合得到的曲线虽然通过了所有的数据点,但是是一条扭曲的曲线,无法将函数模型泛化到激光器波长电流数据关系中,发生过拟合(高方差)。以上的线性回归和五次高阶拟合属于极端情况,认为不是好的模型,所以下面仅对二次、三次、四次函数拟合校准效果进行讨论。

可将式(2)中出射波长和注入电流之间的函数关系表示为:

$$\lambda = f(I) \quad (4)$$

实验采用了电流调谐方式进行波长扫描,通过对型号为 NLKIE5GAAA 的 DFB 激光器注入电流中叠加特定频率幅值的锯齿波扫描信号产生电流调谐信号,通过测量获得电流信号单周期调谐时间 t 和注入电流 I 之间的关系式表示为:

$$I = g(t) \quad (5)$$

将式(4)、(5)两个函数叠置,可以得到出射波长和调谐时间的函数关系式:

$$\lambda = f(g(t)) \quad (6)$$

对注入电流随调谐时间变化的曲线线性拟合,结合拟合参数 k 和 q 的值,函数关系表示为:

$$I = kt + q \quad (7)$$

式中:参数 $k=0.45, q=30$ 。

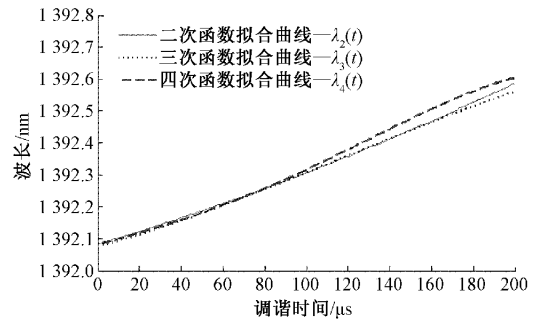
将式(7)代入式(6)中,即可以得到激光器出射波长随调谐时间变化的函数关系:

$$\lambda(t) = f(I) = f(0.45 \times t + 30) \quad (8)$$

结合多项式拟合函数关系(二次、三次、四次)中,可以得到波长—调谐时间函数关系:

$$\begin{cases} \lambda_2(t) = (2.835e-6) \times t^2 + (1.953e-3) \times t + 1392.0827 \\ \lambda_3(t) = (-2.096e-8) \times t^3 + (7.35e-6) \times t^2 + (1.7996e-3) \times t + 1392.0744 \\ \lambda_4(t) = (-2.7e-10) \times t^4 + (6.453e-8) \times t^3 + (2.26e-6) \times t^2 + (1.74e-3) \times t + 1392.08 \end{cases} \quad (9)$$

多项式拟合电流波长变化关系曲线 $\lambda_i(t)$ ($i=2,3,4$) 如图 5 所示。

图 5 各阶次多项式拟合函数 $\lambda_i(t)$ 关系曲线

截取 $\lambda_i(t)$ ($i=2,3,4$) 在区间 $t \in (0, 200)$ 中的最大值和最小值获得 3 组数据:

$$\begin{cases} \lambda_2(0) = 1392.0827 \\ \lambda_2(200) = 1392.5867 \\ \lambda_3(0) = 1392.0744 \\ \lambda_3(200) = 1392.56064 \\ \lambda_4(0) = 1392.0819 \\ \lambda_4(200) = 1392.60454 \end{cases} \quad (10)$$

将 3 组数据 2 点各连成直线,获得 3 组出射波长和调谐时间线性变化的函数关系:

$$\begin{cases} \lambda_2^*(t) = (2.52e-3) \times t + 1392.082 \\ \lambda_3^*(t) = (2.4312e-3) \times t + 1392.074 \\ \lambda_4^*(t) = (2.6132e-3) \times t + 1392.081 \end{cases} \quad (11)$$

分别将式(11)方程对应代入式(9)方程,得到 3 组新的电流随调谐时间的变化关系式:

$$\begin{cases} (2.52e-3) \times t = (1.4e-5) \times i^2 + 0.0035 \times i - 0.1976 \\ (2.4312e-3) \times t = (-2.3e-7) \times i^3 + (5.7e-5) \times i^2 + 0.0012 \times i - 0.1611 \\ (2.6132e-3) \times t = (-6.6e-9) \times i^4 + (1.5e-6) \times i^3 - (8.8e-5) \times i^2 + 0.0058 \times i - 0.21 \end{cases} \quad (12)$$

式(12)即可作为注入驱动电流预校准数学模型公式,作为校准之后的电流信号波形注入激光器。因为考虑了激光器出光阈值电流,所以加了 30 mA 电流偏置,图 6 为各阶次多项式拟合函数加偏置之后的电流校准波形。

3 校准结果及验证

3.1 实验校准

为了测试电流波长调谐线性度补偿效果,将校准后的各阶次驱动电流校准模型注入 DFB 激光器后,通过逐点测量得到校准之后电流波长对应关系,根据注入电流波形输入范围 $I \in (30, 120)$,得到一个电流扫描周期校准前后电流波长比较如表 1 所示。

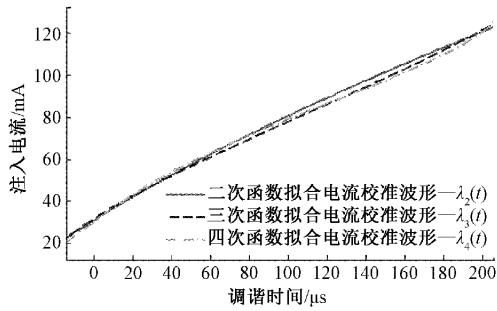


图 6 各阶次驱动电流校准波形

再次利用式(3)均方误差(MSE)对出射波长在无校准、多次项曲线拟合校准状态进行误差比较,这里用 0 代表无校准状态,2、3、4 分别代表二、三、四次拟合曲线函数模型校准状态,MSE 值分布如图 7 所示。

根据图 7,选取的多项式拟合函数模型相比无校准状态,激光器实测波长与目标波长之间的 MSE 值更小,3 种多项式拟合函数模型中,二次多项式拟合函数校准模型优于三次和四次校准结果。结合的多项函数拟合效果和收敛特性,综合考虑,本实验采取二次多项式曲线拟合方法对

表 1 校准前后电流波长值对比

无校准电流 I/mA	无校准对应 波长 λ/nm	二次曲线拟合 校准电流 I^*/mA	校准后对应 波长 λ^*/nm	三次曲线拟合 校准电流 I^*/mA	校准后对应 波长 λ^*/nm	四次曲线拟合 校准电流 I^*/mA	校准后对应 波长 λ^*/nm	目标波长 λ^*/nm
30	1 392.105	30	1 392.105	30	1 392.105	30	1 392.105	1 392.109
32	1 392.113	33.5	1 392.119	34.5	1 392.124	33.5	1 392.119	1 392.126
39	1 392.144	42	1 392.157	42.5	1 392.159	43	1 392.161	1 392.176
48	1 392.188	52.5	1 392.210	52	1 392.207	54	1 392.217	1 392.239
50	1 392.197	56.5	1 392.229	54	1 392.217	56.5	1 392.229	1 392.269
56	1 392.227	62	1 392.267	60.5	1 392.248	62.5	1 392.258	1 392.292
70	1 392.300	76	1 392.337	73.5	1 392.321	75	1 392.330	1 392.376
76	1 392.337	82	1 392.373	79	1 392.355	80	1 392.361	1 392.409
84	1 392.385	90	1 392.419	86	1 392.396	87	1 392.402	1 392.451
90	1 392.419	95	1 392.459	92	1 392.435	91.5	1 392.431	1 392.480
95	1 392.459	99	1 392.488	97	1 392.473	95	1 392.459	1 392.502
100	1 392.496	104	1 392.514	101	1 392.501	100	1 392.496	1 392.525
110	1 392.552	112.5	1 392.569	111	1 392.558	109	1 392.545	1 392.564
115	1 392.586	117	1 392.599	116	1 392.583	114	1 392.579	1 392.582

激光器注入电流进行校准。将二次多项式曲线拟合算法校准前后的 $\lambda-I$ 曲线与目标波长电流曲线做对比,可以得到图 8。

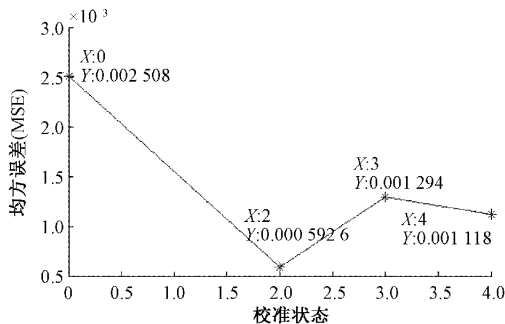


图 7 各阶次多项式拟合校准波长数据 MSE 值

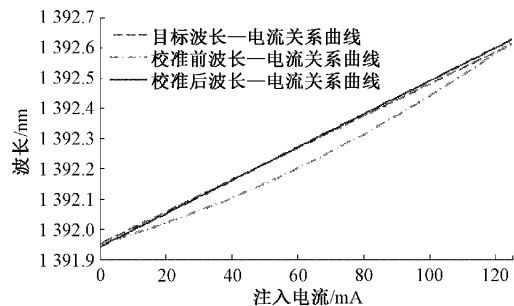


图 8 校准前后电流波长调谐曲线对比

波长满量程变化量($\Delta\lambda$)的比值,关系如式(13)所示,该值越小说明线性度越好。

$$\alpha = \frac{|\Delta\lambda_{\max}|}{\Delta\lambda} \times 100\% \quad (13)$$

通过波长变化量和电流关系曲线可以计算得出,选取激光器中心波长 1 392.185 nm 对应的波长变化量和电流值作为参考点定义为 $\Delta\lambda_{\max}$,校准输出波长变化量满量程定义为 $\Delta\lambda$ 。为结论明显,实验数据处理中分别用各点电流

3.2 校准结果与误差分析

将目标激光器出射波长随着电流变化关系与实际波长数据的非线性误差作为衡量电流波长调谐线性度关系的性能指标。将电流波长调谐非线性误差定义为波长变化实际曲线偏离目标曲线的最大偏差($\Delta\lambda_{\max}$)与校准输出

对应的输出波长减去激光器中心波长 1 392.185 nm,可以得到校准前后波长变化量-电流 ($\Delta\lambda - I$) 关系,如图 9(a)、(b)所示。

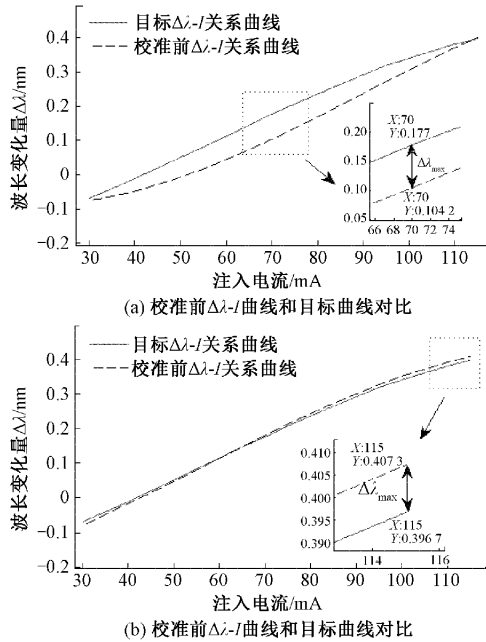


图 9 校准前后波长变化量-电流关系

校准前后波长变化量-电流关系曲线偏离目标关系曲线的最大偏差 $\Delta\lambda_{\max}$,与目标波长变化量 0.473 nm 的比值得到校准前后电流波长调谐非线性误差如表 2 所示。

表 2 校准前后电流波长调谐非线性误差

	$\Delta\lambda_{\max}/\text{nm}$	非线性误差 $\alpha/\%$
校准前	0.06	15.39
校准后	0.010 6	2.24

相比校准前的电流波长调谐非线性误差 15.39%,通过校准后降低至 2.24%,电流波长调谐线性度得到了较为理想的改善。较文献[15]利用延时自外差的方式搭建马赫曾德干涉仪(MZI)将激光器调谐率转换为 MZI 的拍频信号频率,并通过稳定 MZI 的拍频信号频率实现对激光器调谐非线性误差校准方法,本文对实验校准系统进行改进,简化了实验装置并避免了复杂繁琐的实验操作,是一种低成本的实现方法;相比于文献[16]中采用传统光电锁相环电路结合固定三角波调谐信号,在环路中通过反馈的方式使拍信号相位与参考信号相位同步,进而实现锁频的方法达到激光器调谐非线性校正,本文中所设计使用的数控波形信号产生电路很好的满足了激光器电流波长调谐过程中电流调谐信号的波形任意性,通过产生相位、幅度、频率、占空比等参数可调的调谐信号进而使校准结果更加精确,实现了更高精度波长调谐非线性校正方法。

4 结 论

针对 DFB 半导体激光器存在固有的波长调谐非线性,搭建了激光器电流波长测量系统,基于多项式拟合算法推导出激光器注入电流预校准模型。讨论了选取的 3 种多项式拟合曲线函数模型对实测电流波长的校准效果,综合考虑校准数据的 MSE 值和数据收敛特性,结果显示二次多项式拟合函数校准模型优于三次和四次,实验最终采取二次多项式曲线拟合方法对激光器注入电流进行校准,并计算了校准前后调谐非线性误差,结果表明该方法对电流波长调谐过程产生的非线性有良好的校准效果。

本文所述电流调谐的波长非线性校正方法,是在实验平台进行静态调谐特性测量。限于实验条件,所选用的激光器型号单一,进一步的工作可以针对多型号、多波段激光器进行测量,结合本文校准方法并且综合多类型测量数据,可以计算得到适用于多类型 DFB 半导体激光器电流波长校准数学模型,使得本文校准方法更具有适用性。

参考文献

- [1] WANG Y, WEI Y B, LIU T Y, et al. TDLAS detection of propane/butane gas mixture by using reference gas absorption cells and partial least square(PLS) approach [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(20): 8587-8596.
- [2] 李金义, 樊鸿清, 余子威, 等. 非合作目标 TDLAS 室内二氧化碳遥测 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10): 229-236.
- [3] 刘景旺, 杜振辉, 李金义, 等. DFB 激光二极管电流-温度调谐特性的解析模型 [J]. 物理学报, 2011, 60(7): 353-357.
- [4] 高东宇. 准连续调谐激光吸收光谱技术的研究与仪器开发 [D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [5] 张敏骏, 张鸣, 朱煜. 扫描干涉光刻系统光路结构误差分析与验证 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10): 111-120.
- [6] 吴映, 陈迪俊, 孙延光, 等. 半导体激光器光电负反馈线性调频技术研究 [J]. 中国激光, 2013, 40(9): 6-11.
- [7] 安颖, 杜振辉, 刘景旺, 等. 激光自外差相干测量中分布反馈半导体激光器电流调谐非线性的补偿方法 [J]. 物理学报, 2012, 61(3): 183-188.
- [8] 张桐, 曲兴华, 张福民. 基于外部时钟信号触发重采样的激光频率调制测距方法 [J]. 光学学报, 2019, 39(4): 394-400.
- [9] 张杨, 范颖, 王哲, 等. 基于可调谐激光吸收光谱技术的硫化氢检测方法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(12): 1943-1947.
- [10] LI J, LIN Z L, MA J J. Nonlinear response characteristics of the optical frequency modulated lidar [J]. Chinese

- Journal of Lasers, 2012, 39(s2): s214002.
- [11] 颜子恒, 睦晓林, 刘波, 等. 激光多普勒测速中连续波调频非线性的分析与校正[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2413-2418.
- [12] 周佩丽, 谭文, 彭志敏. 基于 TDLAS 的烟气中 CO 浓度混合取样式在线监测[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(11): 233-240.
- [13] QIN J, ZHOU Q, XIE W L, et al. Coherence enhancement of a chirped DFB laser for frequency-modulated continuous-wave reflectometry using a composite feedback loop [J]. Optics Letters, 2015, 40(19): 4500-4503.
- [14] 高红. 基于 DFB-ICL 的高精度高分辨率吸收光谱测量技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [15] 孙瀛. 基于 FPGA 的半导体激光器调频非线性校正技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [16] 张浩. 电流调谐半导体激光器绝对距离测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

作者简介

白建胜, 博士生, 主要从事激光、电磁检测及信号处理研究。

E-mail: 1004869053@qq.com