

半导体激光器光谱局部最大峰值检索算法

侯喜报 刘加庆 张志辉 韩顺利

中国电子科技集团公司第四十一研究所电子测试技术重点实验室, 山东 青岛 266555

摘要 通过分析实测法布里-珀罗型半导体激光器(FP-LD)和分布反馈式半导体激光器(DFB-LD)光谱数据特征,提出了一种基于局部最大矩阵的自适应算法,用于检索半导体激光器光谱峰值。建立数据序列的局部最大矩阵,利用矩阵行向量特征修正该矩阵,根据修正后矩阵的列向量特征定位峰值,并进一步修正和补偿峰值位置。该算法具有较强的抗噪能力,整个检索过程无需人为干预,自适应性和稳健性强,满足实时计算的要求。实测数据计算结果表明,该算法与直接比较法、优化的导数法和遗传算法相比,在检验准确率和计算时间方面优势明显,平均检验准确率可达 98%,平均计算时间仅为 0.12 s,可应用于半导体激光器实测光谱特性实时分析。

关键词 激光器; 峰值检索; 局部最大值; 半导体激光器

中图分类号 O433.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0614002

Local Maximum Algorithm for Detecting Spectral Peaks of Semiconductor Lasers

Hou Xibao Liu Jiaqing Zhang Zhihui Han Shunli

Key Laboratory of Electronic Test & Measurement, The 41st Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Qingdao, Shandong 266555, China

Abstract A self-adaptive local maximum algorithm for detecting spectral peaks of semiconductor lasers is proposed by analyzing actually measured spectrum characteristics of Fabry-Perot laser diode (FP-LD) and distributed feedback laser diode (DFB-LD), and the algorithm can be used to detect the spectra of laser diodes. In the algorithm, a local maximum matrix of data series is established and is modified with its row vector characteristics, and the peak is located with its column vector characteristics that are further amended and compensated. The algorithm is free from manual operation during the whole searching process, has higher noise-resistance, self-adaptability and robustness, and meets the requirements of real-time computation. Compared with the comparison algorithm, optimized derivative algorithm and genetic algorithm, the local maximum algorithm has obvious advantages in terms of accuracy rate and computation time. The average test accuracy rate reaches 98% while the average computation time is only 0.12 s. The algorithm can be applied to real-time analysis of actually measured spectrum characteristics of semiconductor lasers.

Key words lasers; peak detection; local maximum; semiconductor lasers

OCIS codes 140.5960; 300.6170; 300.6260

1 引言

法布里-珀罗型半导体激光器(FP-LD)和分布反馈式半导体激光器(DFB-LD)因输出光相干性好、方向性强、谱宽窄、体积小、简单易用等特点,常用于高速、大容量光纤通信系统中^[1-2]。光谱峰值检索是计算FP-LD和DFB-LD各种光谱参数的基础,实时准确地检索出峰值对于光谱特性分析具有十分重要的意义。

目前,常用的峰值检索算法主要有直接比较法、导数法、对称零面积法、遗传算法、小波变换等^[3-11]。直接比较法和导数法适用于信噪比高的光滑曲线,计算速度快;对称零面积法、遗传算法、小波变换在最优阈值或最优参数下,均具有较好的检索效果,但计算用时长,不适合实时运算^[12]。本文研究的两种激光器光谱实

收稿日期: 2015-12-28; **收到修改稿日期:** 2016-01-28

基金项目: 电子测试技术重点实验室基金(9140C120301150C12057)

作者简介: 侯喜报(1988—),男,硕士,助理工程师,主要从事光电测量仪器方面的研究。E-mail: eiqd@ei41.com

测数据特点和测量条件不同,为达到最优寻峰效果,使用上述算法均需要选取合适的阈值或参数,进行滤波、平滑等预处理^[13-14],由于引入各种参数,因此以上算法的自适应性和稳健性较差。

针对上述问题,本文提出一种自适应局部最大峰值检索算法,通过建立数据序列的局部最大矩阵,利用矩阵行向量特征修正该矩阵,再根据列向量特征定位峰值,无需设置阈值、参数或预处理,根据数据序列固有特征即可较为准确地实时检索出峰值,具有较强的自适应性和稳健性。

2 FP-LD 和 DFB-LD 光谱数据特征

半导体激光器的纵模反映激光器的光谱特性,FP-LD 具有多纵模特性,DFB-LD 由于采用波长选择反馈机制,因而光谱具有单纵模特性^[15]。同时,由于光栅分光光谱仪将由复色光照明的狭缝经过光栅分光系统变为若干单色的狭缝像,因此实际测得光谱的谱线展宽因狭缝宽度不同而不同,通过设定不同的光谱仪分辨带宽,实测光谱的带宽会有所不同,光谱外形或轮廓呈高斯型。图 1 所示为 FP-LD 和 DFB-LD 的实测光谱^[16]。

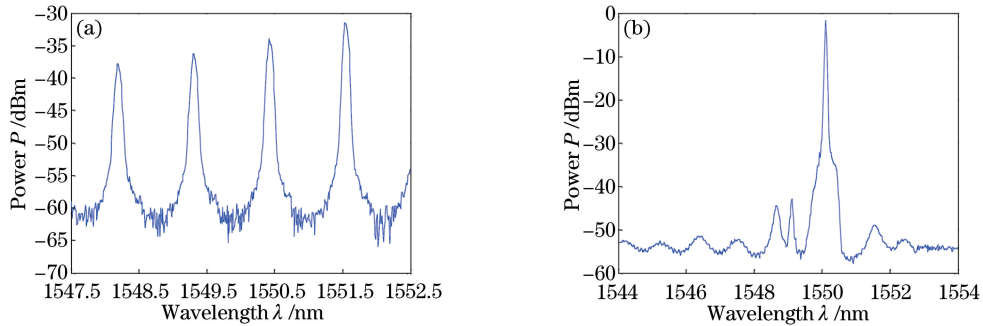


图 1 (a) FP-LD 和 (b) DFB-LD 的实测光谱

Fig. 1 Measured spectra of (a) FP-LD and (b) DFB-LD

分析 25 组实测 FP-LD 和 DFB-LD 光谱数据可知,待检索谱峰数据序列具有如下特性:

- 1) 数据中电平值较低的部分随机波动大,存在均方根值为常数的随机噪声信号,即信噪比低,易出现虚假峰;
- 2) 存在明显大于噪声的高幅值数据点,即动态范围大。该部分数据包含的大谱峰较易检索,但部分光谱数据的大谱峰处曲线不光滑,易造成误判。

3 自适应局部最大峰值检索算法原理

半导体激光器光谱峰值点是指一定范围内光谱数据序列的极大值,符合一定窗口范围内左侧邻近点上升且右侧邻近点下降的趋势规律。基于上述数据序列特征,提出了一种基于局部最大矩阵的自适应峰值检索算法。首先建立数据序列的局部最大矩阵,根据矩阵行向量特征修正该矩阵,再根据列向量特征定位峰值,通过一定的方法进一步修正和补偿峰值位置。

3.1 局部最大矩阵的建立

设 T 为待检索半导体激光器的实测光谱数据序列,序列长度为 n , $T = \{t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n\}$ 。使用窗口宽度为 N 的可变移动窗,比较序列中某一个数据点在范围 N 内和前向边缘点及后向边缘点的大小,比较的逻辑关系值作为波动因子,以波动因子作为数据元素建立矩阵 \mathbf{M} ($m \times n$),其中 $m = \text{floor}[l(T)/2] - 1 = \text{floor}(n/2) - 1$, $l(x)$ 为求取序列长度的函数, $\text{floor}(x)$ 为向下取整函数。窗口宽度 $N = 2i$ ($i = 1, 2, \dots, m$)。对于每一维的 i ($1 \leq i \leq m$) 和 j ($1 \leq j \leq n$),当 $i + 1 \leq j \leq n - i$ 时,波动因子 $m_{i,j}$ 可表示为

$$m_{i,j} = \begin{cases} 0 & t_j \in [(t_j > t_{j-i}) \cap (t_j > t_{j+i})] \\ \text{rand} + 1 & \text{others} \end{cases}, \quad (1)$$

当 $1 \leq j \leq i$ 和 $n - i + 1 \leq j \leq n$ 时,波动因子可表示为

$$m_{i,j} = \text{rand} + 1, \quad (2)$$

式中 rand 表示在 $[0,1]$ 区间内均匀分布的随机数。矩阵 M 可表示为

$$M = \begin{bmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & \cdots & m_{1,n} \\ m_{2,1} & m_{2,2} & \cdots & m_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{m,1} & m_{m,2} & \cdots & m_{m,n} \end{bmatrix} \quad (3)$$

矩阵 M 中的元素是否为 0, 决定范围 N 内光谱数据序列是否存在最大值, 因此称矩阵 M 为局部最大矩阵。

3.2 局部最大维度控制

通过控制局部最大维度, 可以有效过滤虚假峰, 消除噪声影响。局部最大矩阵行向量中 0 元素的分布情况表示该维数据点在移动窗内局部最大的数目, 因此统计矩阵中所有行向量 0 元素的数目, 并找到 0 元素数目最多的行, 记为 p ,

$$p = \max [\text{sum}(m_{i,j} = 0)], \quad (4)$$

式中 max 表示最大值函数, sum 表示求和函数。重新修正局部最大矩阵 M , 去除行数 i 大于 p 的元素, 形成新的矩阵 $M'(p \times n)$,

$$M' = \begin{bmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & \cdots & m_{1,n} \\ m_{2,1} & m_{2,2} & \cdots & m_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{p,1} & m_{p,2} & \cdots & m_{p,n} \end{bmatrix} \quad (5)$$

3.3 谱峰定位和补偿

新矩阵 M' 的列向量元素值是判别数据序列中某元素是否为局部峰值点的直接判断标准, 当某一列元素全为 0 时, 该列对应的数据序列中的元素即为候选峰值点。除此之外, 某数据点如果符合一定窗口范围内左侧邻近点上升且右侧邻近点下降的趋势, 也需归为峰值点, 因此还需要对候选峰值点进行补偿。如果数据点对应的新矩阵 M' 列向量同时满足以下条件, 则认为该数据点符合特定趋势, 加入候选峰值点内:

- 1) 首行元素为 0;

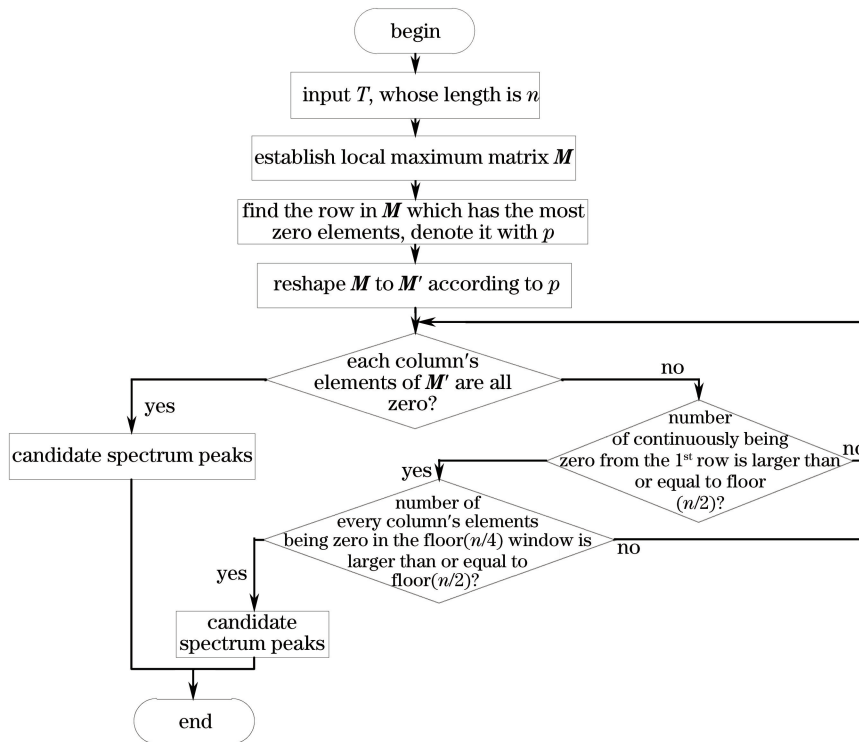


图 2 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of algorithm

- 2) 从首行开始,连续 0 元素的个数 $N_1 \geq \text{floor}(n/2)$;
- 3) 以该列为中心,窗口范围在 $\text{floor}(n/4)$ 内的左右各列中 0 元素的个数 $N_2 \geq \text{floor}(n/2)$ 。
- 通过上述步骤即可在无需设置阈值或参数的前提下准确定位光谱数据峰值点。

4 实验与分析

4.1 算法基本流程

自适应局部最大峰值检索算法流程如图 2 所示。根据该流程编写算法程序,检索 25 组实测数据峰值,该数据通过光纤跳线连接 FP-LD 和 DFB-LD 在不同条件下使用光谱分析仪测得,测量条件如表 1 所示。

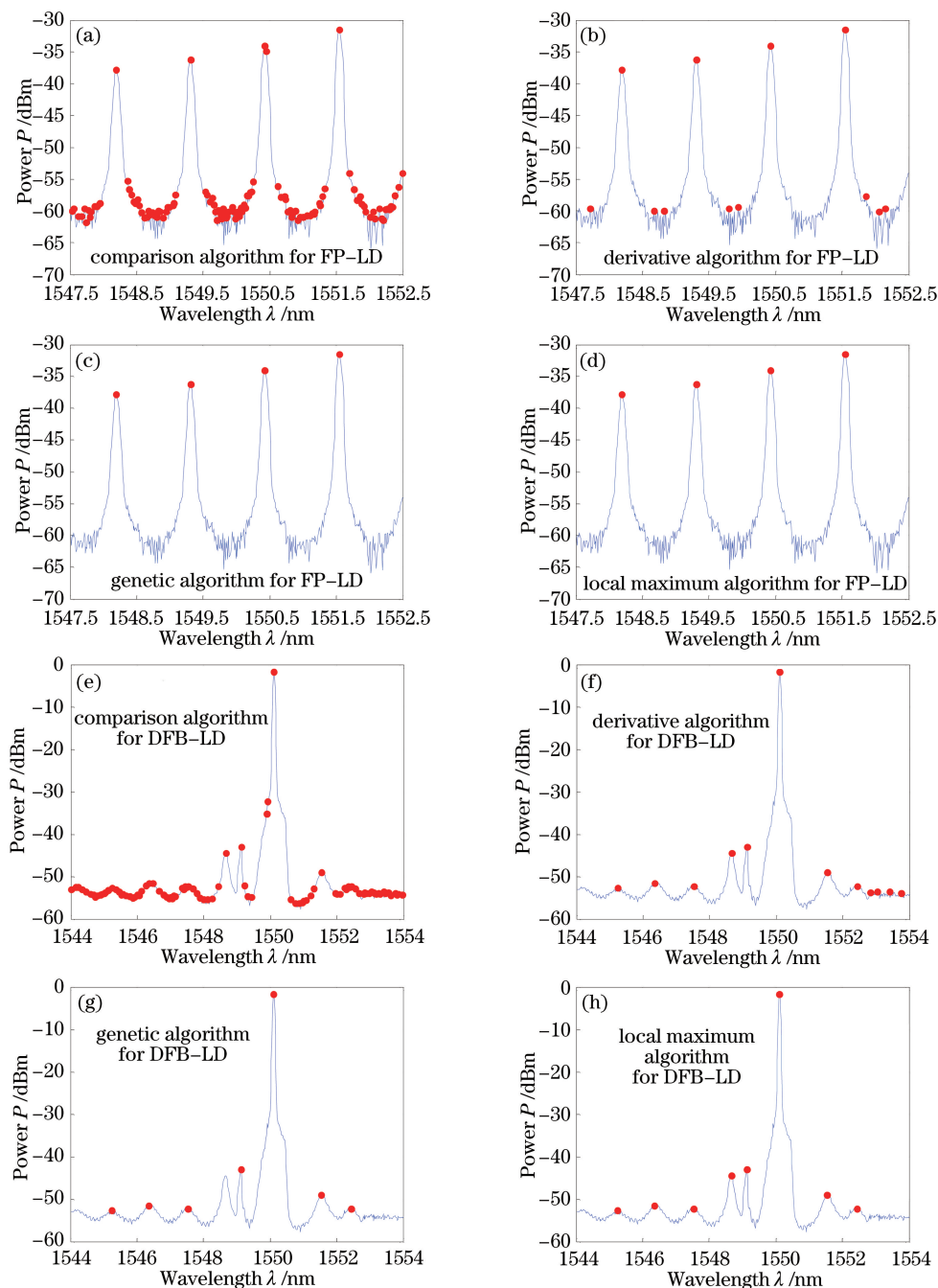


图 3 4 种算法峰值检索对比图

Fig. 3 Comparison among four algorithms for peak detection

表 1 光谱数据不同测量条件设置

Table 1 Different parameter settings for spectrum data measurement

Parameter	Data setting
Center wavelength /nm	1310/1550
Resolution bandwidth /nm	0.05, 0.07, 0.10, 0.20, 0.50, 1.00
Sweep bandwidth /nm	5, 10, 20

4.2 不同算法检测准确率对比实验分析

对 25 组实测数据使用直接比较法、导数法、遗传算法及本文提出的自适应局部最大法进行峰值检索。为提高检验准确度,设置阈值过滤虚假峰,优化导数法。遗传算法需要设置种群规模、初始种群、迭代次数、交叉概率、变异概率 5 个参数,导数法需设置 1 个阈值参数,直接比较法和自适应局部最大法无需设置参数。

使用上述 4 种算法对图 1 两种谱型进行峰值检索,效果如图 3 所示。

为验证算法检索效果,定义漏检率 q_1 为漏检个数与实际峰值个数之比,错检率 q_2 为错检个数与检出峰值个数之比,算法检索效果用加权和值作为评价标准,定义评价函数 E_1 为

$$E_1 = 1 - (e_1 q_1 + e_2 q_2), \quad (6)$$

式中权值 $e_1 = e_2 = 50\%$ 。 E_1 代表算法的检验准确率,统计 4 种算法对 25 组实测数据的检验准确率,结果如图 4 所示。

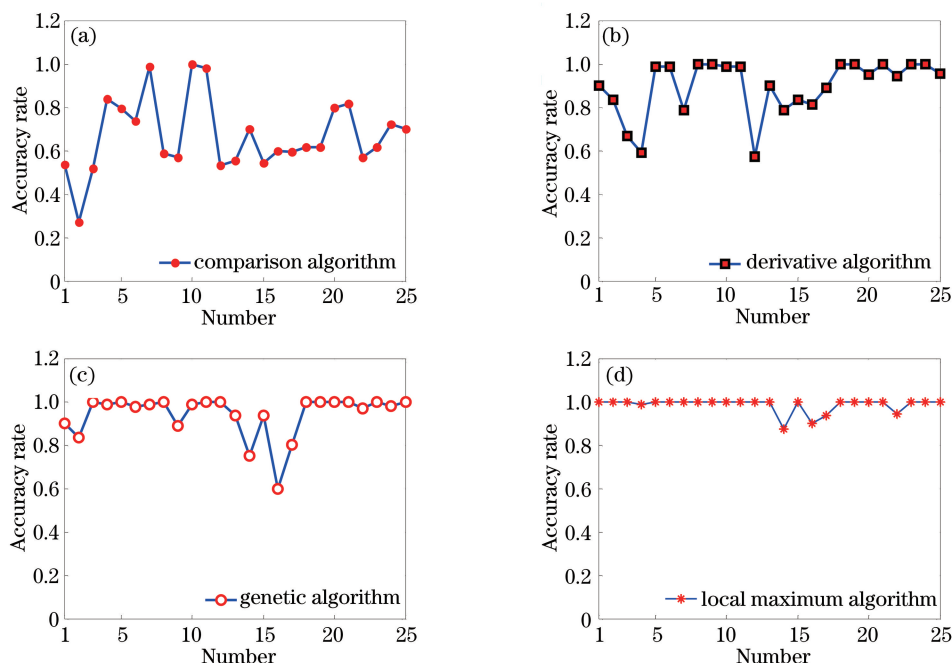


图 4 4 种算法检验准确率对比

Fig. 4 Accuracy rate comparison among four algorithms

对检验准确率求取平均值,得到直接比较法的平均检验准确率为 0.67,优化的导数法为 0.89,遗传算法为 0.94,自适应局部最大法为 0.98。

由检索结果结合实验分析数据可知,直接比较法抗噪性较差,必须先对序列进行滤波去噪的平滑处理;通过设定阈值在一定程度上提高了导数法的抗噪能力,但效果有限;遗传算法通过设定最优参数,可以获得较好的检索效果;自适应局部最大法在无需设置阈值参数、未对数据进行预处理的前提下,对 FP-LD 和 DFB-LD 的光谱数据均适用,稳健性较强,检验准确率较高。

4.3 不同算法实时性对比分析

实测数据采样点均为 500 个,统计 4 种算法检索实测数据峰值所用时间,对比结果如图 5 所示。

对所用时间求取平均值,直接比较法计算时间平均值为 0.12 s,优化的导数法为 0.32 s,遗传算法为 1.24 s,自适应局部最大峰值检索算法完全可以满足实时计算的要

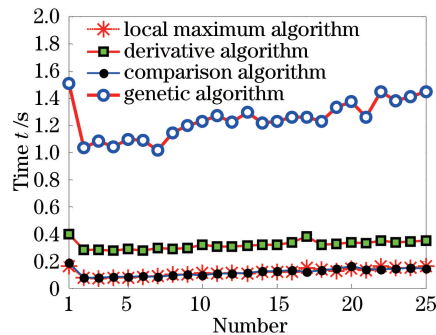


图 5 4 种算法计算时间对比图

Fig. 5 Computation time comparison among four algorithms

求,利于后续光谱特性的快速分析和计算。

5 结 论

根据 FP-LD 和 DFB-LD 光谱数据序列特征,提出了一种自适应局部最大峰值检索算法,无需设置阈值参数,无需进行滤波去噪、平滑、去除背景基线漂移等预处理,该算法检验准确率高,自适应性和稳健性强,求解速度快,简单易行。实测数据计算结果表明,该算法能够克服噪声影响,平均检验准确率达到 98%,平均用时仅为 0.12 s,较其他峰值检索算法优势明显。该算法可以应用于半导体激光器光谱自动实时分析,对开发高性能光谱分析仪器具有实际意义。

参 考 文 献

- Duan Hui. The response characteristics of semiconductor lasers based on rate equations [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2010: 1-9.
段 慧. 基于速率方程的半导体激光器响应特性研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2010: 1-9.
- Campos J M, Destrez A, Jacquet J, *et al.*. Ultra-fast optical spectrum analyzer for DWDM applications [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2004, 53(1): 124-129.
- Jacobson M L. Auto-threshold peak detection in physiological signals [C]. Proceedings of the 23rd Annual International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society, IEEE, 2001: 2194-2195.
- Chen Liang. Research on the nuclide identification algorithm and digital spectra acquisition system [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009: 34-37.
陈 亮. 核素识别算法及数字化能谱采集系统研究[D]. 北京: 清华大学, 2009: 34-37.
- Wang Qiaoni, Yang Yuanhong. A FBG spectrum peak detection technique based on Steger image algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0810004.
王巧妮, 杨远洪. 基于 Steger 图像算法的光纤布拉格光栅寻峰技术[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0810004.
- Chen Yong, Yang Kai, Liu Huanlin. A self-adaptive peak detection algorithm to process multi-peak fiber Bragg grating sensing signal [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0805008.
陈 勇, 杨 凯, 刘焕淋. 多峰光纤布拉格光栅传感信号的自适应寻峰处理[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0805008.
- Bi Yunfeng, Li Ying, Zheng Ronger. The symmetric zero-area conversion adaptive peak-seeking method research for LIBS/Raman spectra [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(2): 438-443.
毕云峰, 李 颖, 郑荣儿. LIBS/Raman 光谱对称零面积变换自动寻峰方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(2): 438-443.
- Yi Longtao, Liu Zhiguo, Chen Man, *et al.*. A new automatic analysis method for X-ray fluorescence spectrometric qualitative analysis [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(7): 073001.
易龙涛, 刘志国, 陈 曼, 等. 一种 X 射线荧光光谱数据批处理新方法的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(7): 073001.
- Wang Linyu, Kang Xin. Research on MUSIC spectral peak searching based on improved population genetic algorithms [J]. Application Research of Computers, 2014, 31(12): 3543-3545.
王霖郁, 康 新. 基于种群优化的遗传算法的 MUSIC 谱峰搜索技术[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(12): 3543-3545.

- 10 Singh O, Sunkaria K R. A robust R-peak detection algorithm using wavelet packets[J]. International Journal of Computer Applications, 2011, 36(5): 37-43.
- 11 Chen Pengfei, Tian Di, Qiao Shujun, *et al.*. An automatic peak detection method for LIBS spectrum based on continuous wavelet transform[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(7): 1969-1972.
陈鹏飞, 田 地, 乔淑君, 等. 一种基于连续小波变换的 LIBS 光谱自动寻峰方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(7): 1969-1972.
- 12 Liu Kang. Research on the key technology of the miniature spectrometer and its application system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013: 88-90.
刘 康. 微型光谱仪关键技术及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 88-90.
- 13 Tang Bin, Wei Biao, Mao Benjiang, *et al.*. Noise analysis and denoising research on the UV-visible absorption spectroscopy water quality detection system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 043002.
汤 斌, 魏 彪, 毛本将, 等. 紫外-可见吸收光谱法水质检测系统的噪声分析与处理研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 043002.
- 14 Wang Shutao, Zeng Qiujun, Song Haobing, *et al.*. Signal denoising method based on the SVM filter absorption methane detection[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0915001.
王书涛, 曾秋菊, 宋浩兵, 等. 基于 SVM 滤波器的吸收式甲烷检测的信号去噪方法[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0915001.
- 15 Ji Yuefeng. Modern optical fiber communication technology[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 1997: 160-162.
纪越峰. 现代光纤通信技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1997: 160-162.
- 16 Han Jun. Research on key technology in thin-film thickness wideband monitoring system[D]. Xi'an: Xidian University, 2011: 31-33.
韩 军. 光学膜厚宽带监控关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011: 31-33.