

## 基于激光驱动等离子体光源的近红外傅里叶变换光谱系统

王 玥<sup>1, 3, 4</sup>, 陈 楠<sup>1, 2, 3, 4</sup>, 王博雨<sup>1, 5</sup>, 刘 涛<sup>1, 3, 4\*</sup>, 夏 洋<sup>1, 2, 3, 4\*</sup>

1. 中国科学院微电子研究所, 北京 100190
2. 中国科学院大学, 北京 100049
3. 北京市微电子制备仪器设备工程技术研究中心, 北京 100029
4. 集成电路测试技术北京市重点实验室, 北京 100089
5. 北京交通大学研究生院, 北京 100044

**摘 要** 近红外傅里叶变换光谱仪作为一种常用的科研级近红外光谱检测仪器, 广泛应用于各个科研领域。目前的近红外光谱仪着重于光谱分辨率方面的提升, 在光谱信噪比提升方面关注较少。光谱信噪比直接影响光谱线指数测量精度的优劣, 光谱信噪比越高, 光谱线指数测量精度越高, 越有利于对微量物质进行精细光谱比对。因此, 提升光谱仪的光谱信噪比是十分必要的。对比常用的钨灯光源, 激光驱动等离子体光源(LDLS)不仅在近红外区域具有高光照强度的优点, 而且其独特的高频调制输出信号在经锁相放大器调制解调后能够很好的抑制背景信号对干涉光谱所带来的影响。高亮度与辐射调制的结合使得以 LDLS 作为光源的近红外傅里叶变换光谱系统在光谱信噪比方面获得显著提升。基于上述原因, 提出利用新型激光驱动等离子体光源作为光谱信号输出源的近红外傅里叶变换光谱系统, 并与含有调制能力的钨灯光源搭建的近红外傅里叶变换光谱系统进行了信噪比的比较实验。首先利用钨灯光源由斩波器高频调制再经过锁相放大器解调的方式, 对锁相放大器积分时间进行优化并通过计算干涉光谱信噪比进行评估, 分别对比了积分时间为 0.5, 1, 5, 10 和 20 ms 的干涉光谱信噪比与对称度, 确定后续系统中的锁相放大器最佳积分时间为 5 ms, 该状态下钨灯光源所实现的干涉光谱信噪比经计算约为 90 : 1; 其次利用激光驱动等离子体光源代替钨灯光源和斩波器, 在最佳积分时间下进行干涉光谱信噪比对比评估, 结果表明激光驱动等离子体光源的干涉光谱信噪比与传统钨灯光源相比提升 111 倍; 最后, 利用近红外标准片对系统进行光谱测量准确性评估, 结果表明利用该光源的近红外傅里叶变换光谱系统的近红外吸收峰值误差 < 0.5 nm, 具有高光谱准确性与分辨能力。

**关键词** 傅里叶变换光谱仪; 激光等离子体; 近红外光谱技术; 锁相放大; 信噪比

**中图分类号:** O433.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)06-1666-08

### 引 言

随着科学技术的不断进步和飞速发展, 红外光谱检测作为一种常见的物化特性表征方式被广泛应用于各个领域<sup>[1]</sup>, 不同波段的红外光谱也被证明能够实现不同物质的特异性表征<sup>[2]</sup>。20 世纪 60 年代, “近代近红外光谱之父”Norris<sup>[3]</sup>提出了针对近红外光谱信息的提取与分析所使用的多元线性回归算法, 极大的促进了近红外光谱理论体系的建立。到目前为

止, 近红外光谱已经被广泛应用于诸多领域以此来作为一种标准的物质质量评估技术<sup>[4-9]</sup>。傅里叶变换近红外光谱仪作为一种常用的科研级近红外光谱分析仪器, 长久以来一直被广大学者应用于近红外光谱分析中。该仪器主要利用迈克尔逊干涉仪代替棱镜或光栅来获得干涉图<sup>[10]</sup>。这种方式获得的光谱数据再经由傅里叶变换后会具有较高的光谱分辨率, 从而极大程度的保留了物质相关信息。并且从科研角度考虑, 光谱分辨率越高, 意味着能够获得的物质信息越详细, 有助于对物质物化特征的深入了解。影响光谱分辨率的因素

收稿日期: 2021-04-08, 修订日期: 2021-08-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFA0704804), 中国科学院关键技术团队项目(GJJSTD20200005, GJJSTD20200003), 中国科学院科研装备研制项目(YJKYYQ20180035)资助

作者简介: 王 玥, 1988 年生, 中国科学院微电子研究所博士研究生, 博士后 e-mail: wangyue@ime.ac.cn

\* 通讯作者 e-mail: liutao@ime.ac.cn; xiayang@ime.ac.cn

有很多，如反射镜速度误差<sup>[11]</sup>、镜片类型<sup>[12]</sup>、机械误差<sup>[13]</sup>、光谱信噪比<sup>[14]</sup>等。其中最直接的影响因素就是光谱信噪比（signal-to-noise ratio, SNR），光谱信噪比的高低直接影响光谱线指数测量精度。因此，有效提高光谱信噪比是提升光谱测量精度的关键。

光谱信噪比是指光谱信号与背景信号之间的比值。因此，提升信噪比最直接的方式就是提高光谱信号强度以及抑制背景信号。提升光谱信号强度最直接的方式就是提升光源的光照强度。常用近红外光谱仪一般采用多种光源（如钨/卤素灯）组合的方式来实现光谱测量，这些光源的弊端在于，其光照强度会由于长时间的工作而将持续下降，从而导致仪器光谱信噪比受到影响。激光驱动等离子体光源（laser drive plasma light source, LDLS）是采用激光泵浦的方式维持等离子体放电发光<sup>[15]</sup>，是一种能够长时间稳定输出高光照强度的宽频谱白光光源。图 1 为不同光源经相同焦距尺寸的离轴抛物面镜准直聚焦后所得光谱覆盖波段与光照强度对比。抑制背景信号最常用的方式是将光源信号经过斩波器进行高频调制再由锁相放大器进行频率解调<sup>[16]</sup>，过滤非光源频率下的杂散信号，实现背景信号抑制。值得注意的是，LDLS 光源由于激光泵浦驱动的原因，输出的光信号自身就带有高频调制信号。图 2 给出了 LDLS 光源被探测器采集到的高频信号及频率周期，其中频率周期为 50 kHz。这种高频信号的产生在后续实验过程中恰好能够代替斩波器高频调制的作用，与锁相放大器配合来实现抑制背景信号的效果。因此，LDLS

光源兼备提升光谱信号强度及抑制背景信号的功能，从而实现光谱信噪比的大幅度提升。

综上所述，为了提高近红外光谱分辨率，促进人们对物质信息的深入了解，本工作搭建了一种全新的能够获得高光谱信噪比的近红外傅里叶变换光谱系统。先利用传统钨灯作为近红外光源，通过斩波器与锁相放大器相结合的方式，实现近红外光谱检测与信号提取并获得积分时间参数最优解。再将光源更换为 LDLS，进行近红外傅里叶变换光谱系统的搭建，同步实现光谱信号强度的提升以及背景信号的抑制，以此来实现光谱信噪比的大幅度提升。最后利用该系统对近红外标准片进行近红外光谱检测，评估系统的近红外光谱线测量准确性。为 LDLS 光源在近红外傅里叶变换光谱系统中的使用提供可靠依据。

### 1 实验部分

为确保所测数据结果的准确性，本实验采用两种不同实验光路以实现近红外傅里叶变换光谱仪的搭建：

(1) 搭建斩波器对钨灯丝光源进行频率调制并用锁相放大器进行解调的近红外傅里叶变换光谱系统，以此来确定在一定动镜移动速度下锁相放大器积分时间对解调后的光谱信噪比及光谱对称性所带来的影响。

(2) 利用 LDLS 光源搭建的近红外傅里叶变换光谱系统并通过锁相放大器对光谱信号解调，以此探究光源对光谱信噪比的提升情况。

为确定白光干涉光谱各位置所对应的波数，在系统搭建过程中，需要在系统中加入与近红外光路共用分束器、动镜和定镜的激光干涉系统用来进行位置定标。同时，为保证干涉光路的稳定性，激光信号经干涉系统被位置传感器接收，再实时反馈到电动平台上装有动镜的压电陶瓷装置对光路进行实时准直矫正。最终采用的两种近红外傅里叶变换光谱系统光路如图 3 所示，两种光路的切换简单易行，LDLS 光源所对应的光路只需要在光路中移除斩波器并且将光源更换为

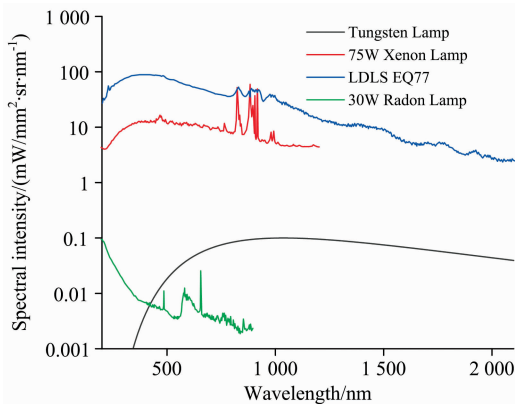


图 1 不同光源光谱强度及覆盖波段对比  
Fig. 1 Spectral intensity and coverage band comparison of different sources

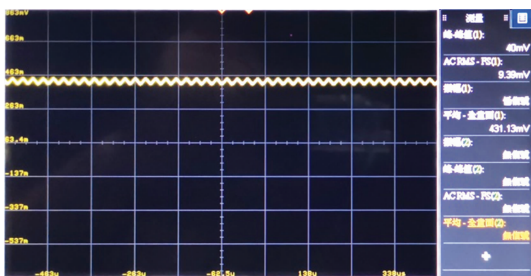


图 2 LDLS 光电信号及频率周期  
Fig. 2 Photosignal and frequency of LDLS

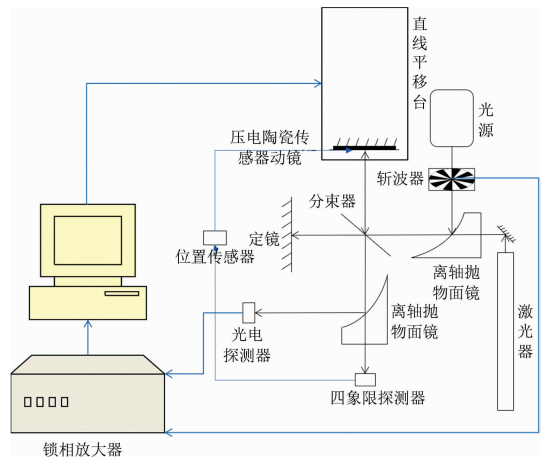


图 3 近红外傅里叶变换光谱仪光路图  
Fig. 3 Optical path of near-infrared Fourier transform spectrometer

LDLS 光源即可。实验中动镜移动速度为  $0.01 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，移动距离  $0.1 \text{ mm}$ 。

上述光路所需实验器材及型号如表 1 所示。

近红外傅里叶变换光谱检测所用样品为稀土元素掺杂玻

璃近红外标准样品(厂家:北京鑫昶光电科技),该标准样品可长时间不受温度、时间、湿度的影响。其近红外标准峰位如表 2 所示。

表 1 实验所需设备及主要参数

Table 1 The equipment and model required for the experiment

| Name                          | Main Parameters   | Product Model  | Manufacturers      |
|-------------------------------|---|----------------|--------------------|
| LDLS                          | Radiance $>40 \text{ mW} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{sr} \cdot \text{nm}$<br>$\lambda=170\sim 2100 \text{ nm}$ | EQ77           | Energetiq          |
| He-Ne Laser                   | $P=21 \text{ mW}$<br>$\lambda=632.8 \text{ nm}$   | 22037146/1145P | Edmund             |
| Lock-in amplifier             | Sample Rate $210 \text{ MSa} \cdot \text{s}^{-1}$<br>The frequency of work $0.7 \mu\text{Hz}\sim 50 \text{ MHz}$    | HF2LI          | Zurich Instruments |
| Halogen tungsten light source | $\lambda=360\sim 2600 \text{ nm}$<br>$P>10 \text{ mW}$  | SLS201L/M      | Thorlabs           |
| Chopper                       | Chopper frequency $10 \text{ kHz}$  | MC1F10HP       | Thorlabs           |
| InGaAs Photodetector          | $\lambda=900\sim 2570 \text{ nm}$   | PDA10DT-EC     | Thorlabs           |
| Position sensing detector     | $\lambda=400\sim 1050 \text{ nm}$   | PDQ30C         | Thorlabs           |
| Off-axis mirror               | $f=100 \text{ mm}$  | MPD249-M01     | Thorlabs           |
| Data acquisition card         | Sample Rate $3.57 \text{ MSa} \cdot \text{s}^{-1}$  | PCIe-6374      | NI                 |

表 2 近红外标准样吸收峰及带宽

Table 2 Near-infrared peak and bandwidth of standard sample

| Serial number | Peak /nm | Bandwidth /nm | Peak /nm | Bandwidth /nm |
|---------------|----------|---------------|----------|---------------|
| 1             | 1 070.2  | 2             | 1 068.3  | 5             |
| 2             | 1 220.3  | 2             | 1 220.5  | 5             |
| 3             | 1 363.7  | 2             | 1 362.9  | 5             |
| 4             | 1 464.7  | 2             | 1 464.6  | 5             |
| 5             | 1 524.0  | 2             | 1 524.0  | 5             |
| 6             | 1 938.4  | 2             | 1 939.0  | 5             |

根据实验光路图所搭建的两种近红外傅里叶变换光谱仪

如图 4 所示。

## 2 结果与讨论

关于信噪比的评估,当处于零光程差的位置上时,此时的峰值是所有波段光幅度叠加后产生的,并且在该位置上,干涉强度的数值最大,所以干涉图零光程差位置的信噪比值可以用作干涉图的信噪比值,定义如式(1)

$$\text{SNR}_I = \frac{I(0)}{\sigma(I(0))} \quad (1)$$

式(1)中,  $I(0)$ 为光程差为零时的干涉强度,  $\sigma(I(0))$ 为零光程差位置的背景信号。

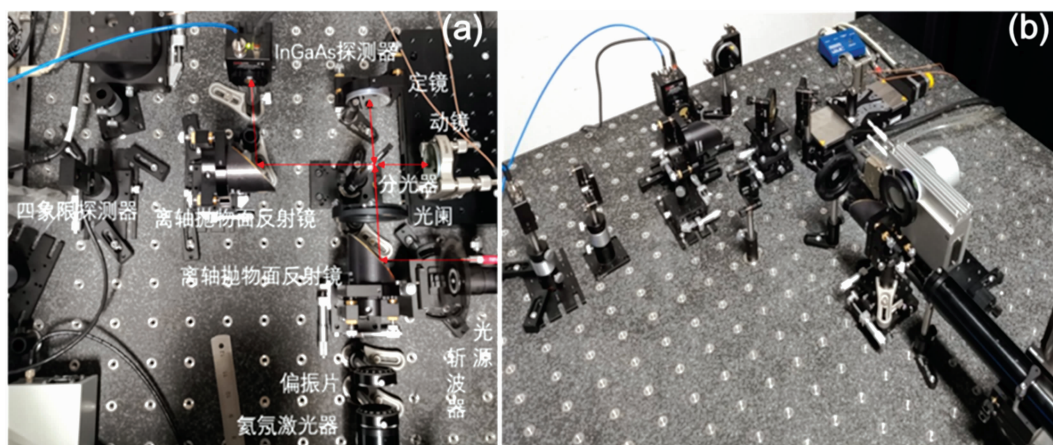


图 4 近红外傅里叶变换光谱系统

(a): 斩波器高频调制光源光谱系统; (b): LDLS 系统

Fig. 4 Near-infrared Fourier transform spectrometer system

(a): Light source high-frequency modulated by using chopper; (b): LDLS system

由于最终评估的是光谱信噪比。所以在上述计算公式基础上应去除仪器噪声对结果的影响。经由探测器进入到锁相放大器中的光谱信息同时也包含了探测器本身存在的本底信号。因此，检测到的光谱背景信号和干涉信号需要扣除探测器的本底信号。所以式(2)可转换为

$$SNR_I = \frac{I(0) - I_1}{\sigma(I(0)) - I_1} \quad (2)$$

式(2)中， $I_1$  为探测器在无光信号输入时的本底信号。

这里需要说明的是，本工作采用的信噪比计算与对比方式均为针对系统原始干涉光谱所展开研究的，与市面上所给出的傅里叶变换光谱仪计算信噪比的方式有所不同，市面上傅里叶变换光谱仪信噪比计算方式虽然也是 P-P 值法<sup>[17]</sup>，但是他们是根据傅里叶变换后经过长时间平均、积分所得到的结果。而本工作的对比方式是为了能够更为精准的确定 LDLS 光源能够给系统干涉光谱所带来的信噪比提升而选择的在相同条件下对采集的白光干涉光谱进行信噪比对比，即式(2)所提到的  $SNR_I$  值。

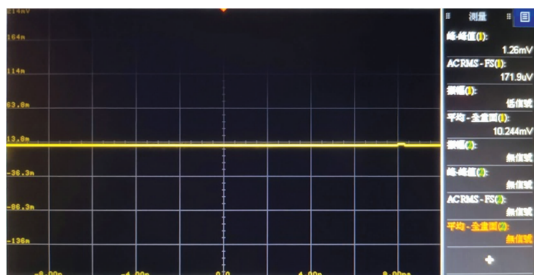


图 5 无光信号输入时探测器本底噪声

Fig. 5 Detector background noise without light signal input

如上所述，测量式(2)中的参数  $I_1$ 。利用示波器对探测器进行无光源信号输入时的本底信号采集，结果如图 5 所示。

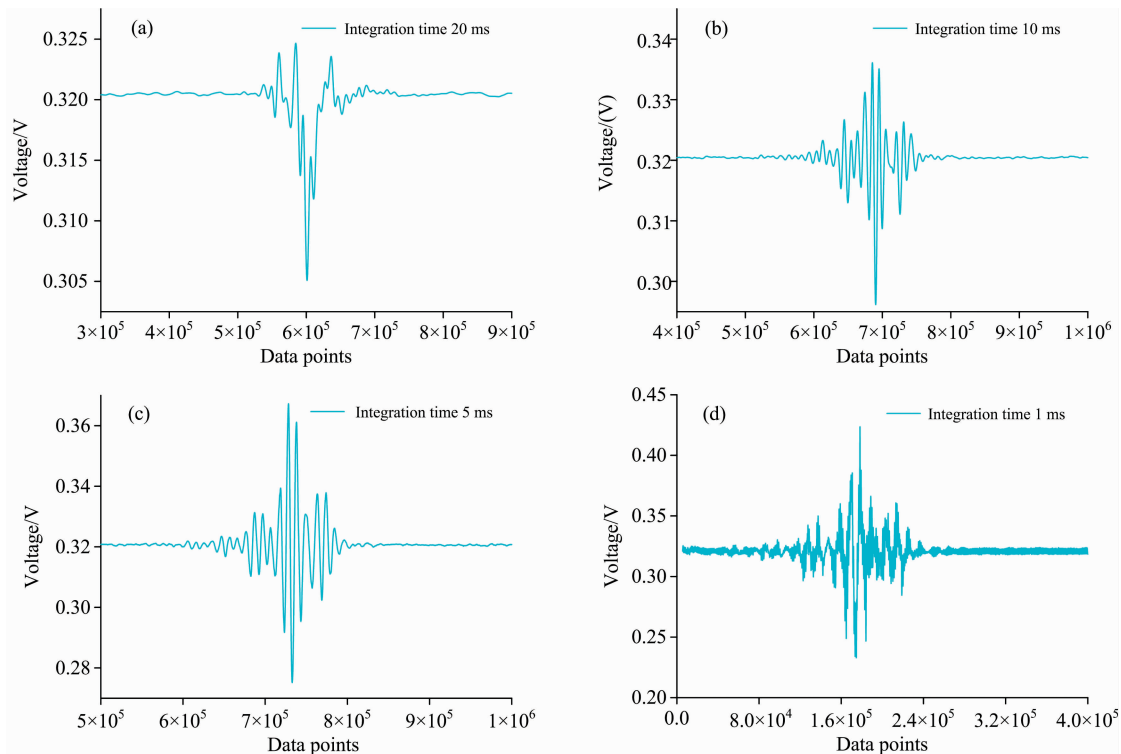
如图 5 所示，无光源信号输入时探测器所产生的本底信号为  $I_1 = 1.26 \text{ mV}$ 。

### 2.1 高频调制钨灯丝光源的近红外干涉光谱采集及积分时间优化

斩波器与锁相放大器的引入主要是为了实现背景信号的抑制，实验所选用的斩波频率为该型号斩波器所能达到的最高频率 10 kHz，以此来对光源进行高频调制并通过锁相放大器对其进行解调，从而在抑制背景信号的同时获得该状态下的近红外白光干涉光谱。

在理想状态下，积分时间越长，抑制噪声和抗干扰的能力越强。依据锁相放大器的原理，通过更长时间的积分可以获得更高的信噪比，但是更长的积分时间也将降低仪器单次采样的分析速度。为了避免这样的事情发生，往往采用对光源进行高频调制的方式，在更短的积分时间内获得同等的信噪比提升效果。因此在高频调制下，获取合适的积分时间是十分必要的<sup>[10]</sup>。高频调制时不同积分时间系统采集的白光干涉光谱及信噪比对比结果如图 6 所示。

如图 6 所示，通过调整锁相放大器积分时间得到不同积分时间下的白光干涉光谱。可以明显看出，随着积分时间的增大，干涉光谱的噪声在逐渐降低，同时光谱信噪比被逐渐优化。但是，当积分时间超过 5 ms 时光谱完整性与对称性开始产生明显缺失。因此，综合光谱信噪比与光谱对称性两方面考虑，为了获得较高光谱信噪比并保留光谱完整性，后续 LDLS 系统数据采集过程中积分时间设置为当前最优积分时间 5ms，该种状态下光谱信噪比经式(2)计算为 90 : 1。



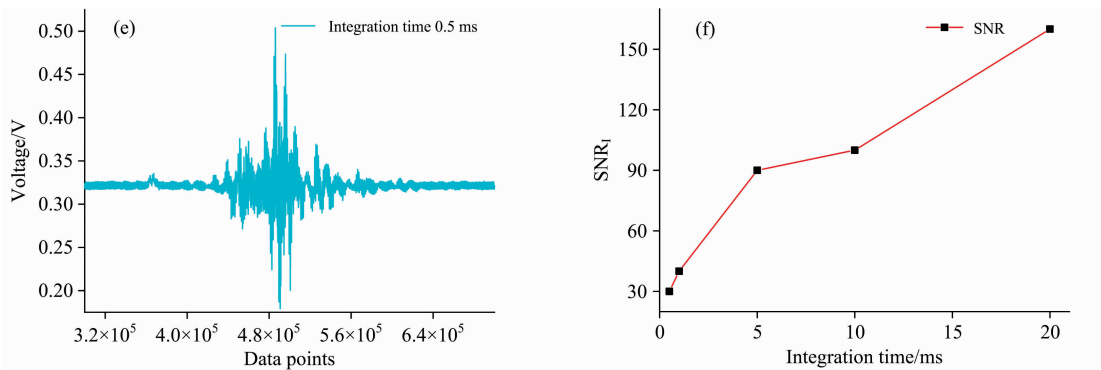


图 6 锁相放大器积分时间不同所测光谱结果对比

(a): 积分时间=20 ms; (b): 积分时间=10 ms; (c): 积分时间=5 ms;  
(d): 积分时间=1 ms; (e): 积分时间=0.5 ms; (f): 信噪比对比曲线

Fig. 6 The spectral comparison results with different integration times of the lock-in amplifier

(a): Integration time=20 ms; (b): Integration time=10 ms; (c): Integration time=5 ms;  
(d): Integration time=1 ms; (e): Integration time=0.5 ms; (f): SNR<sub>I</sub> vs integration time

## 2.2 LDLS 的近红外干涉光谱信息采集

经过上述实验与参数优化,可以确定利用锁相放大器对高频信号进行频率解调是可以实现高频信号光源下的傅里叶变换光谱系统搭建及光谱数据采集的。因此,利用同样的光

路系统,将光源更换成 LDLS 光源并去掉斩波器,利用数据采集卡对锁相放大器解调后的信号进行数据采集,所得结果如图 7 所示。其中图 7(a)为未解调所得到的干涉光谱,图 7(b)为解调后的干涉光谱。

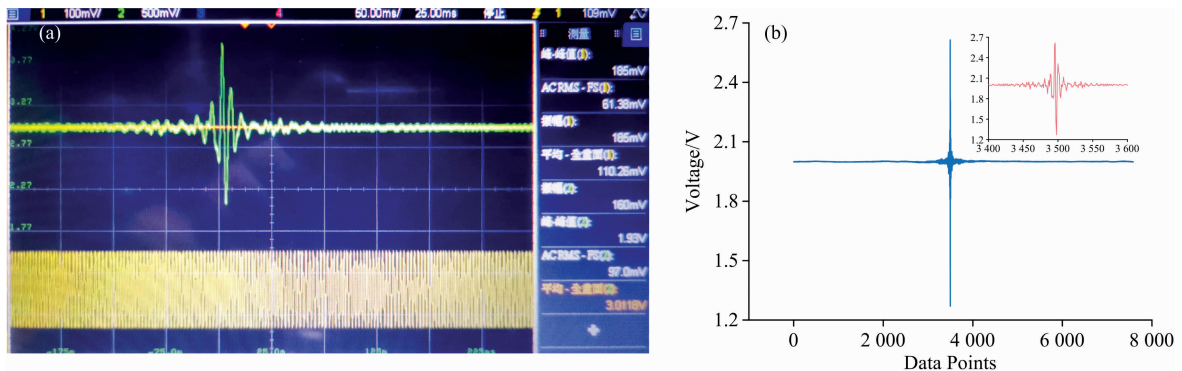


图 7 LDLS 傅里叶变换白光干涉光谱测试结果

(a): 未解调; (b): 解调

Fig. 7 Fourier transform interference spectral results with LDLS

(a): Without demodulation; (b): With demodulation

图 7(b)给出了更换为 LDLS 光源后的经锁相放大器解调后的傅里叶变换光谱系统测得的白光干涉光谱,右上角放大结果为中心强干涉部分的光谱细节。图 7(a)为未解调状态下系统的测试结果,经计算干涉光谱信噪比约为 48 : 1。这里涉及到的背景噪声为图 2 所示,光源在未干涉、未解调时所产生的背景信号  $N=40$  mV。这种低干涉信噪比的产生主要是由于未解调状态下高频光源的背景信号过高导致的。而经过锁相放大器解调后会大幅度降低背景信号  $N$ ,从而达到显著提高干涉信噪比的效果。

通过对图 7(b)所示解调后干涉光谱进行信噪比评估计算发现,该光源所搭建的傅里叶变换光谱系统的光谱信噪比约为 10 000 : 1,与未更换光源相比光谱信噪比提升了约 111 倍,且局部放大的光谱具有较高的光谱对称性(中心对称)及

光谱辨识度。图 8 描述更换光源前后光谱信噪比的变化。关于信噪比的大幅提升,可以对结果进行如下解释:

LDLS 光源强度如图 1 所示,能够清晰发现,其强度相对于卤素钨灯在近红外波段 900~2 000 nm 处提升了~100 倍,这种光源强度的提升实际上是增加了如式(2)所述的干涉信号输出强度。与此同时光源本身输出的高频调制信号在经锁相放大器调制解调后,也有有效的抑制了背景杂散信号的影响。综合上述结果,基于 LDLS 的近红外傅里叶变换光谱系统能够大幅度提升干涉光谱信噪比是合理的。

## 2.3 标准样品的近红外傅里叶变换光谱检测

为了进一步确定所搭建光谱系统实用性,需要利用近红外标准样品对系统进行干涉光谱测试验证。具体方法为,将近红外标准样品置于光电探测器前,使干涉后的白光经由标

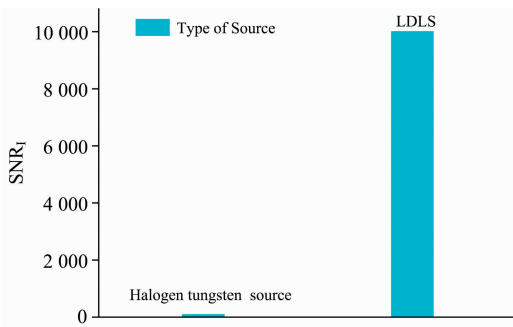


图 8 更换光源前后光谱信噪比对比结果

Fig. 8 Spectral SNR<sub>t</sub> before and after replacing the light source

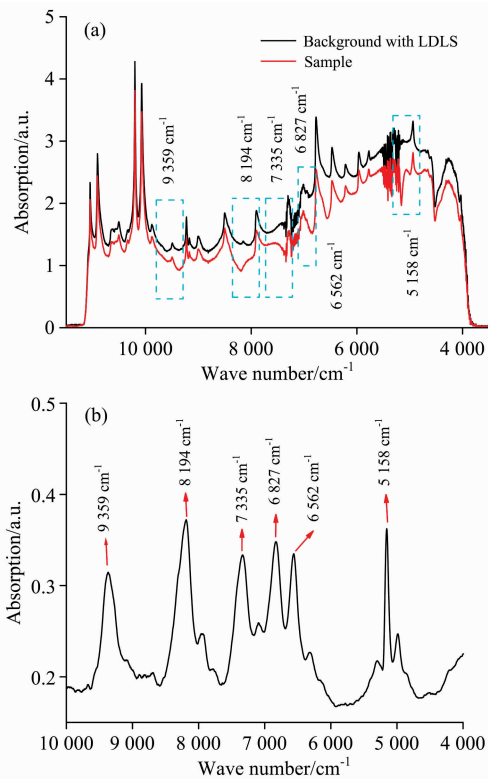


图 9 LDLS 傅里叶变换光谱系统下的近红外标准片吸收谱线测试

(a): 未加样品与加样品后傅里叶变换光谱图;  
(b): 去背景后的近红外标准样品傅里叶变换光谱图

Fig. 9 The near-infrared standard sample absorption spectra measured with LDLS Fourier transform spectral system

(a): Fourier transformation spectra with and without standard sample; (b): near-infrared Fourier transformation spectra with background removed

准片后被探测器收集, 并经由锁相放大器解调输出到数据采集卡中。对比加入标准片与未加入标准片时两干涉光谱的差别, 对比结果如图 9 所示。

图 9 为近红外标准样品的白光干涉光谱图, 图 9(a)代表了 LDLS 光源本身及干涉光经过样品后的傅里叶变换光谱; 图 9(b)为扣除 LDLS 光源背景后所得样品近红外吸收特征峰值。对比厂家给出的近红外标准样品吸收峰值和实验测得的峰值, 如表 3 所示。

表 3 标准峰值与实测峰值对比

Table 3 Comparison of standard peaks and test peaks

| Standard peaks 1/nm | Standard peaks 2/nm | Test peaks /nm |
|---------------------|---------------------|----------------|
| 1 070.2             | 1 068.3             | 1 068.5        |
| 1 220.3             | 1 220.5             | 1 220.4        |
| 1 363.7             | 1 362.9             | 1 363.3        |
| 1 464.7             | 1 464.6             | 1 464.8        |
| 1 524.0             | 1 524.0             | 1 523.9        |
| 1 938.4             | 1 939.0             | 1 938.7        |

表 3 中, 厂家给出的标准吸收峰 1 所对应的误差线宽为 2 nm, 标准吸收峰 2 所对应的误差线宽为 5 nm。与标准谱线结果相比, LDLS 系统所搭建的傅里叶变换光谱系统其针对标准吸收峰 1 时的误差平均值~0.5 nm, 相对于标准吸收峰 2 时的误差平均值~0.3 nm, 光谱吸收峰检测准确性良好。因此, 通过利用近红外标准样品对系统进行测试证明, LDLS 光源所搭建的近红外傅里叶变换光谱系统能够很好的获得高质量的物质近红外吸收特征曲线。为这种光源在近红外光谱测试领域的应用提供可较为可靠的实验依据。

### 3 结 论

使用新型 LDLS 光源搭建高光谱信噪比近红外傅里叶变换光谱系统并利用该系统实现了对近红外标准样的精准测量。在文章初始阶段, 利用斩波器高频调制钨灯丝光源并使用锁相放大器解调高频信号的方式, 获得了高频调制下的锁相放大器积分时间最优解; 此后, 将系统光源更换为 LDLS 并进行系统测试, 结果表明更换光源后的光谱系统与未更换光源时相比, 干涉光谱信噪比提升约 111 倍; 最后, 利用近红外标准样品对系统进行光谱检测准确性校验, 结果表明该光源所搭建的近红外傅里叶变换光谱系统对近红外标准样品吸收峰的检测误差平均值<0.5 nm, 优于标准样品给出的误差范围。证明该种光源所搭建的近红外傅里叶变换光谱系统在具有高于干涉光谱信噪比的同时硬具备良好的光谱准确性, 能够应用于近红外领域的物质分析。

### References

[ 1 ] Salimi A, Yousefi A A. Polymer Testing, 2003, 22(6): 699.  
 [ 2 ] ZHAN Xi-xiong, LIN Jun, ZHOU Zhi-heng(占细雄, 林 君, 周志恒). Chinese Journal of Scientific Instrument(仪器仪表学报), 2002,

- (S1): 29.
- [ 3 ] McClure, W. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2003, 11(1): 487.
- [ 4 ] Khan M I H, Rahman M M, Karim M A. *Drying Technology*, 2020, 38(5-6): 557.
- [ 5 ] ZHU Yuan-yuan, CHEN Yong-kuan, LIU Zhi-hua, et al(祝元元, 陈永宽, 刘志华, 等). *Applied Chemical Industry(应用化工)*, 2010, 39(11): 1750.
- [ 6 ] Rinnan R, Rinnan A. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39: 1664.
- [ 7 ] Dr, René, Gislum. *NIR News*, 2009, 20(6): 4.
- [ 8 ] Akikazu Sakudo. *Clinica Chimica Acta*, 2016, 455: 181.
- [ 9 ] WANG Peng-ze, HE Lei, WU Guang-peng, et al(王鹏泽, 何雷, 武广鹏, 等). *Modern Agriculture Research(现代农业研究)*, 2021, 27(12): 22.
- [10] Bates J B. *Computers & Mathematics with Applications*, 1978, 4(2): 73.
- [11] LÜ Jin-guang, LIANG Zhong-zhu, FU Jian-guo, et al(吕金光, 梁中翥, 付建国, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2011, 31(10): 2865.
- [12] Takada K, Seino M, Chiba A, et al. *Optics Communications*, 2013, 296: 61.
- [13] Yang Qinghua. *Applied Optics*, 2010, 49(21): 4088.
- [14] Brimmer Paul, Streamer Richard, LIANG Yong-jia(Brimmer Paul, Streamer Richard, 梁永佳). Importances of Spectral Resolution, Wavelength Accuracy, Signal-to-Noise Ratio and Their Interrelations in NIR Analysis Methods(光谱分辨率, 波长准确性和信噪比及其相互关系在近红外分析方法中的重要性). *National Conference on Near-Infrared Spectroscopy(全国近红外光谱学术会议)*, 2008.
- [15] Wagner M, Jakob D S, Horne S, et al. *ACS Photonics* 2018, 5: 1467.
- [16] YU Ya-dong(余亚东). *Laser & Infrared(激光与红外)*, 2021, 51(11): 1460.
- [17] Sellar R G, Glenn D B. *Applied Optics*, 2005, 44(9): 1614.

## Fourier Transform Near-Infrared Spectral System Based on Laser-Driven Plasma Light Source

WANG Yue<sup>1, 3, 4</sup>, CHEN Nan<sup>1, 2, 3, 4</sup>, WANG Bo-yu<sup>1, 5</sup>, LIU Tao<sup>1, 3, 4\*</sup>, XIA Yang<sup>1, 2, 3, 4\*</sup>

1. Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Beijing Research Center of Engineering and Technology of Instrument and Equipment for Microelectronics Fabrication, Beijing 100029, China

4. Beijing Key Laboratory of IC Test Technology, Beijing 100089, China

5. School of Graduate, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

**Abstract** As a commonly used scientific research-grade near-infrared spectral detection instrument, the near-infrared Fourier transformation spectrometer is widely used in various scientific research fields. The current near-infrared spectrometer focuses on improving spectral resolution and pays less attention to the improvement of the spectral signal-to-noise ratio. The spectral signal-to-noise ratio directly affects the accuracy of spectral line index measurement, the higher the spectral signal-to-noise ratio. The higher the accuracy of spectral line index measurement, the more conducive to the fine spectral comparison of trace substances. Therefore, it is necessary to improve the spectral signal-to-noise ratio of the spectrometer. Compared with commonly used tungsten light sources, laser-driven plasma light sources (LDLS) not only have the advantages of high light intensity in near-infrared regions but also their unique high-frequency modulation output signal can be well suppressed by the background signal on the interference spectrum after modulation and deconstruction by the lock-phase amplifier. The combination of high brightness and radiation modulation has significantly improved the spectral signal-to-noise ratio of the near-infrared Fourier transformation spectral system with LDLS as the light source. For the above reasons, this paper proposes to use the new laser-driven plasma light source as the spectral signal output source of the near-infrared Fourier transformation spectral system, and with the modulation ability of tungsten light source set up by the near-infrared Fourier transformation spectral system to carry out a comparative experiment of signal-to-noise ratio. Firstly, the tungsten light source is used by chopper high-frequency modulation and then de-adjusted by the lock-phase amplifier, the integration time of the lock-phase amplifier is optimized, and the interference spectral signal-to-noise ratio is calculated by using the signal-to-noise ratio evaluation method given in the text. The signal-to-noise ratio is compared separately, the integral time is 0.5, 1, 5, 10 and 20 ms, respectively. Interference spectrum

signal-to-noise ratio and symmetry, and the optimal integration time of the phase-lock amplifier in subsequent systems are determined to be 5ms. The interference spectrum signal-to-noise ratio of tungsten light sources in this state is calculated to be about 90 : 1. The system built by using laser-driven plasma light source instead of a tungsten light source and chopper is used to build the system of the light source at the optimum integration time. The results of the comparative evaluation of interference spectrum signal-to-noise ratio of traditional light source systems show that the interference spectrum signal-to-noise ratio of laser-driven plasma light sources is 111 times higher than that of conventional tungsten light sources. The results show that the near-infrared Fourier transformation spectral system, constructed by the light source, has a peak error of 0.5 nm < near-infrared absorption and has hyperspectral accuracy and resolution.

**Keywords** Fourier transform spectrometer; Laser plasma; Near infrared spectroscopy; Lock-in amplifier; Signal-to-noise ratio

(Received Apr. 8, 2021; accepted Aug. 17, 2021)

\* Corresponding authors

## 第 22 届全国分子光谱学学术会议暨 2022 年光谱年会 (第一轮通知)

由中国光学学会和中国化学会以及中国光学学会光谱专业委员会主办的“第 22 届全国分子光谱学学术会议暨 2022 年光谱年会”将于 2022 年 11 月 11 日—14 日在云南昆明召开,会议由云南师范大学承办。本次大会是我国光谱科学工作者的又一次学术盛会,将秉承前 21 届分子光谱学学术会议之宗旨,全力展示我国在光谱及相关领域的最新研究进展及取得的成果。同时,会议为增进广大光谱科学工作者及其支持光谱事业的企事业单位的交流与合作搭建平台,共同促进我国光谱事业的发展。届时大会组委会将邀请国内外光谱及相关领域的院士、知名专家学者到会作大会报告,会议还将组织各类专题讨论和学术交流活动。

### 征文范围

分子光谱理论以应用研究,包括红外光谱、拉曼光谱、荧光光谱、磷光光谱、紫外-可见吸收光谱、化学发光等光谱技术在物理、化学、生物、材料科学、表面/界面科学、医药、环境、工业过程、催化学、地学、农林及其他领域的基础理论与应用研究的最新科研成果。光学工程、原子光谱、激光光谱、光谱成像等各类光谱技术的新理论和应用研究成果。同时也欢迎光谱相关技术新的基础研究和应用成果。

### 论文摘要要求

1. 论文内容必须是未在期刊杂志上发表过或其他全国或国际会议宣读过。
2. 提交论文扩展摘要一份,纸张大小用 A4 纸版式(用 Office word 软件排版,页边距为 2 cm,单倍行距)。
3. 扩展摘要按以下顺序排版:文题(三号黑体居中);作者(四号仿宋居中);单位(小四号宋体居中,含所在省市、邮政编码、电子邮址(如有));论文的创新性,研究意义与结果(五号宋体);关键词和主要参考文献(自版芯左起,五号宋体)。文稿中可穿插主要论据的图、表和照片,图题、图注和表题、表注一律用英文表述。摘要的字数,包括图,表,参考文献,总共不能超过 2 个页面。
4. 具体投稿要求可参看模板及《光谱学与光谱分析》征稿简则。稿件一经录用,将由《光谱学与光谱分析》以增刊或会议论文集形式发表。论文摘要模板请参考: <http://www.sinospectroscopy.org.cn/uploads/newsfile/20110928105323.doc>
5. 论文摘要截稿日期:2022 年 6 月 30 日。

### 论文摘要提交方式

欢迎大家通过网站提交论文,请您注册登陆光谱网(<http://www.sinospectroscopy.org.cn>),在会议主页会议会展栏目下的本次会议通道,点击会议投稿按提示要求上传您的论文摘要。论文摘要将组织专家评审或采用网上评审的方式,您可在网上浏览对您论文的评审结果和修改意见。若通过电子邮件方式提交论文,请发往: [ouquanhong@163.com](mailto:ouquanhong@163.com)。