

Rapid Analysis of Edible-Oil Refractive Index Based on Fiber Optical Michelson Interferometer

Hui Ge, Xiaolan Li, Jin Zhang, Ying Wei

School of Science, Tianjin University of Technology, Tianjin

Email: 13110096297@163.com, lxl6788@163.com

Received: Jan. 2nd, 2018; accepted: Jan. 16th, 2018; published: Jan. 23rd, 2018

Abstract

Refractive index is an important indicator of edible oil quality. In this paper, we proposed a rapid measurement method for the refractive index of edible oil based on a new fiber Michelson interferometry structure. It combined a glass capillary with the classical dual-arm fiber optical Michelson interferometer. The simulation results confirmed that this method could quickly measure the refractive index of edible oil, and has a high sensitivity. The resolution is lower than 0.000001. This method provides a convenient and effective way for testing edible oil quality.

Keywords

Fiber Optical Michelson Interferometer, Refractive Index, Edible Oil, High Sensitivity

基于光纤迈克尔逊干涉仪的食用油折射率的快速测量

葛 慧, 李晓兰, 张 静, 魏 颖

天津理工大学理学院, 天津

Email: 13110096297@163.com, lxl6788@163.com

收稿日期: 2018年1月2日; 录用日期: 2018年1月16日; 发布日期: 2018年1月23日

摘 要

折射率是反映食用油品质的一项重要指标。为测量食用油的折射率, 本文提出了一种新光纤迈克尔逊干

涉仪结构, 它由经典的双臂光纤迈克尔逊干涉仪和一段玻璃毛细管构成。模拟结果表明, 利用该方法能够对食用油折射率进行快速测量, 同时具有极高精度, 最小分辨率小于0.000001, 能为测量食用油品质及地沟油的现场检测提供一种简单有效的手段。

关键词

光纤迈克尔逊干涉仪, 折射率, 食用油, 高灵敏度

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

食品安全是当今社会的一个重大问题, 食用油作为人们不可缺少的食品, 关系着人们的健康。尤其是目前出现了很多“地沟油”出现在食用油市场, 严重的危害了人们的健康和生活品质。针对这一问题, 研究学者们提出了多种方法来鉴别食用油品质, 有光学, 电化学分析、分子生物学等技术分析方法[1] [2] [3]。光学方法中使用较多的有太赫兹波段光谱[4]、红外光谱[5]和荧光光谱[6]分析等。这些光谱分析法主要通过对比观察正常油品与劣质油品的吸收光谱或发射光谱之间的差别来进行油品的品质鉴别, 但实际的精炼地沟油或同一品种的复热油分子结构近似, 与正常油品之间的差异很难被区分出来[7], 需要处理样品及专业的分析。

表征使用油品质的指标有很多, 折射率是其中一个重要指标[8]。一般情况下, 油品的混合浓度、油品是否掺假可以通过其折射率之间的差别来进行有效的甄别[9]。通常油品的折射率可以通过阿贝折射率仪、分光仪和干涉法来进行测量[10] [11] [12]。阿贝折射仪通过全反射临界角的测定来测量液体折射率, 不需要处理样品, 但测量精度只有0.005, 且清洗过程复杂。利用分光计最小偏向角法需待测液加工成三棱镜状, 测量时间长。采用干涉法利用折射率引起的干涉条纹的变化来检测液体折射率, 快捷, 较高分辨率, 但是光路需要仔细的调节, 对操作人的技术水平有一定要求。

光纤迈克尔逊干涉仪将光干涉法在空间传输的光路集成在光纤内, 不需要进行精细的调整, 即可形成干涉[13]。本文提出了一种通过观测谐振峰的中心波长漂移来快速测量食用油折射率的方法: 在常见光纤迈克尔逊干涉臂后连接一段玻璃毛细管, 待测油品装入毛细管内, 油品折射率的不同, 形成的干涉光谱的谐振峰中心波长会发生改变。模拟和测试表明, 这种方法可快速得到不同样品的折射率。

2. 测量装置及原理

迈克尔逊干涉仪是光学实验中的一种经典测量方法, 其原理简单、测量精度高, 但是干涉条纹不容易分辨, 读数困难。光纤迈克尔逊干涉仪将光路集成在光纤中, 通过检测光谱的变化来感测外界变化。但是由于油质折射率要高于光纤纤芯折射率, 因而不好测量, 我们对普通光纤迈克尔逊干涉仪的结构进行了改造, 如图1所示(圆框内把结构局部放大, 以方便观察)。在传感臂光纤的尾端连接一段毛细玻璃管作为测量样品区, 并在毛细玻璃的尾部紧贴一个平面镜来保证每次测量样品的长度, 以及提高反射率。

光源的光经过一个 2×2 的光纤耦合器, 在另外一端被分成两束光。其中一个光纤端面切平, 光在光纤端面部分光反射回耦合器, 另外一路在光纤切平的端面后连接了毛细玻璃管, 这样会形成两个反射面, 一个是光纤和待测油形成的界面, 另外一个为待测油后的平面镜, 这两个反射面都会反射部分光返回耦

合器，经过耦合器合束后，由光谱仪接收检测。实验时只需要将毛细玻璃管内注入需要检测的油样品即可，每次更换样品前将样玻璃毛细管清理干净，如图 2 所示。

光源采用一个宽带连续光 I ，经过 2×2 耦合器后分为两束光，其中一束进入参考臂，在参考臂末端反射后，有部分光 I_1 又返回耦合器；另外一束进入传感臂，在光纤和油的端面，有部分光 I_2 又返回耦合器，还有一部分光会进入玻璃毛细管中，在平面镜处反射返回耦合器，为 I_3 。三束光可分别表示为

$$I_1 = q\sqrt{r_1}I \tag{1}$$

$$I_2 = (1-q)\sqrt{r_2}Ie^{-j2\phi_1}, \phi_1 = \frac{2\pi n_1(l_2 - l_1)}{\lambda} \tag{2}$$

$$I_3 = (1-q)(1-r_2)\sqrt{r_3}\alpha^2 Ie^{-j2\phi_2}, \phi_2 = \frac{2\pi(n_1l_2 + n_2l_3 - n_1l_1)}{\lambda} \tag{3}$$

式中， q 为耦合器的分光比， n_1 为光纤的纤芯折射率， n_2 为玻璃管内待测油的折射率， α 为光在玻璃管内的传输损耗， l_1 、 l_2 和 l_3 分别为光纤 1 和光纤 2 和玻璃管的长度， l_1 、 l_2 、 l_3 分别为三束光走过的距离， r_1 、 r_2 、 r_3 分别为三个端面的反射率，根据菲涅尔公式，反射率取决于端面两端的折射率，可表示为：

$$r_1 = \frac{(n_1 - 1)^2}{(n_1 + 1)^2} \tag{4}$$

$$r_2 = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \tag{5}$$

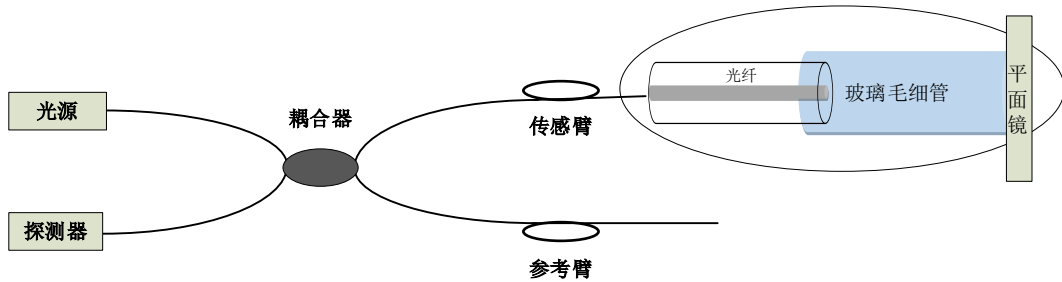


Figure 1. Structure diagram of the proposed Michelson interferometry
图 1. 提出的光纤迈克尔干涉仪结构示意图

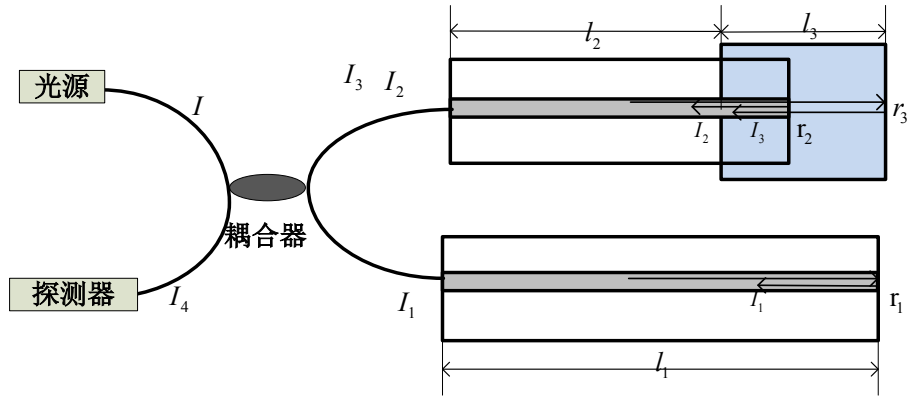


Figure 2. Schematic diagram of the proposed Michelson interferometry
图 2. 提出的迈克尔逊干涉仪干涉原理示意图

假设平面镜的反射率 $r_3 = 0.99$ 。三束光经过耦合器的耦合同时到达探测器，探测器接收到的相对光强可表示为：

$$I_4 = \left| \frac{I_1 + I_2 + I_3}{I} \right|$$

$$= q^2 r_1 + (1-q)^2 r_2^2 + (1-q)^2 (1-r_2)^2 r_3^2 + q(1-q)\sqrt{r_1}\sqrt{r_2} \cos(2\phi_1)$$

$$+ q(1-q)(1-r_2)\sqrt{r_1}\sqrt{r_3} \cos(2\phi_2) + (1-q)^2 (1-r_2)\sqrt{r_2}\sqrt{r_3} \cos(2\phi_1 - 2\phi_2)$$
(6)

光纤纤芯的折射率 n_1 为 1.4682，而合格的油的折射率约为 1.472，因此 r_2 的值大约为 10^{-6} ，非常的小，因此，式(6)的第 5 项起主要作用。可以看出，探测器最后接收的光强 I_4 关于入射波波长 λ 是 a 为周期的余弦函数，其中 a 为

$$a = n_1 l_2 + n_2 l_3 - n_1 l_1$$
(7)

当入射波波长满足下式的条件时，光强达到最小值

$$\lambda_N = \frac{n_1 l_2 + n_2 l_3 - n_1 l_1}{2N+1}, \quad N = 0, 1, 2, 3, \dots$$
(8)

式中， λ_N 称为第 N 个谐振峰的中心波长，可以看出 λ_N 与待测油的折射率成正比，可用于检测待测油折射率的变化。

3. 模拟分析

图 3(a) 是利用波传输法模拟光在装有待测油的玻璃毛细管内的传输情况。模拟设置玻璃毛细管内径 $130 \mu\text{m}$ ，外径 $250 \mu\text{m}$ ，待测油折射率 1.4726，长度 2 mm 。从图 3(a) 中可以看出，光在光纤内传输损耗几乎为 0，但在一进入待测油区域，光强会迅速分散降低，在 1 mm 后由于毛细管管壁的反射作用会有略微的起伏变化，传输距离与最后剩余的光强的关系如图 3(b) 所示。从图 3(a) 中可以看出，剩余的光强在传输距离大约为 1.5 mm 时最大，因此后面的模拟设置待测油区域长度为 1.5 mm ，传输损耗 $\alpha = 17.3\%$ 。

式(6)的第 5 项的系数决定了接收到余弦峰的对比度，对比度越大越容易观察。根据式(6)可以看出，当 $q\sqrt{r_1} = (1-q)(1-r_2)\sqrt{r_3}\alpha^2$ 时，光谱中谐振峰的对比度最大，代入数据可得，约在 $q = 0.13$ 时，谐振峰对比度最大，根据常见的耦合器比例，我们选取最接近的 $q = 0.1$ 。利用 matlab 对探测接收到的光谱进行

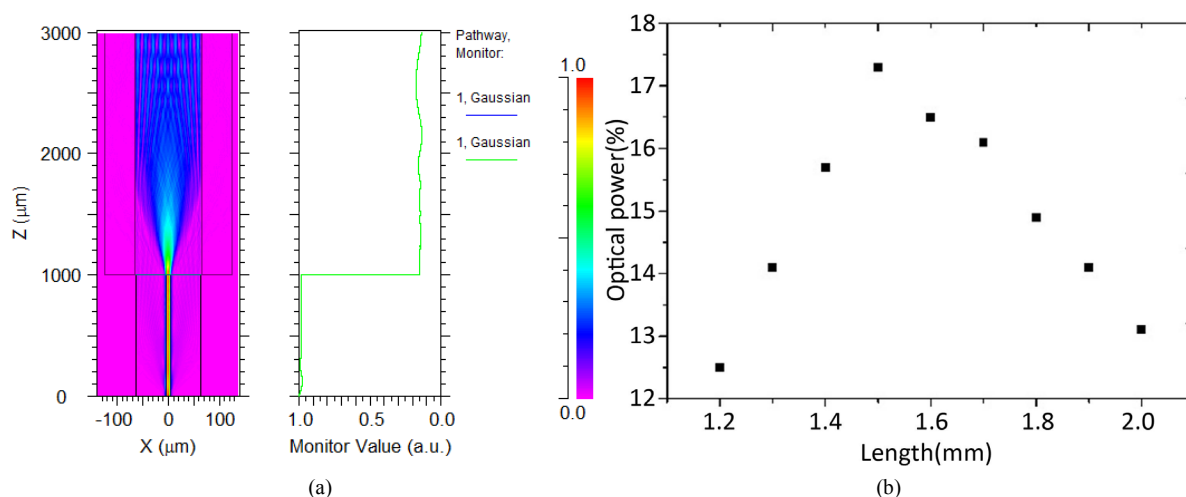


Figure 3. (a) Beam propagation in the glass capillary filled with oil; (b) optical power change with the length of the glass capillary
图 3. (a) 光在装满油的玻璃毛细管内的传输情况，(b) 能量随玻璃毛细管的长度变化

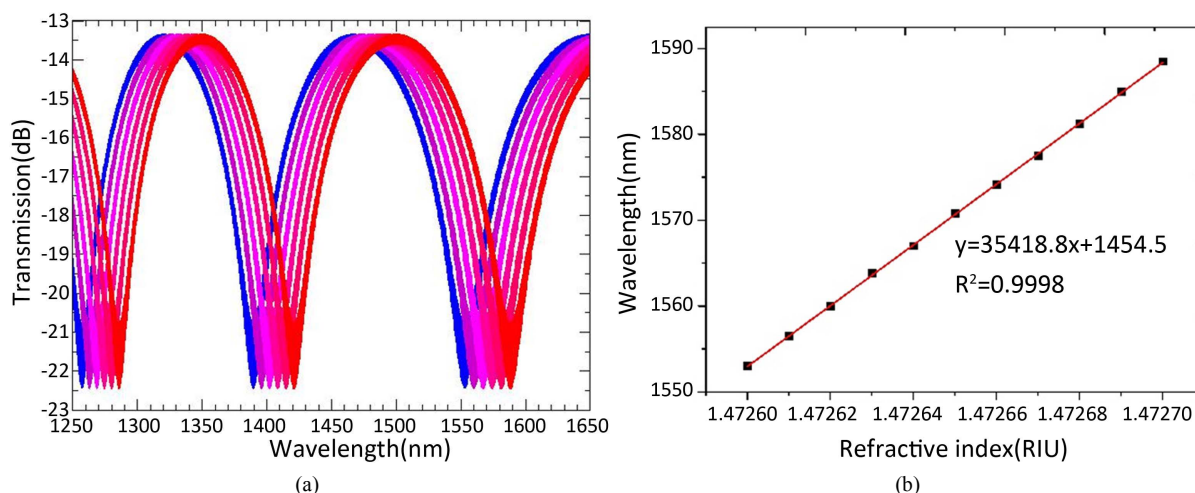


Figure 4. (a) Beam propagation in the glass capillary filled with oil; (b) optical power change with the length of the glass capillary
图 4. (a) 光在装满油的玻璃毛细管内的传输情况, (b) 能量随玻璃毛细管的长度变化

模拟分析。模拟结构参数设置: 光源为 1250 nm~1650 nm 的宽带光源, $n_1 = 1.4682$, $r_3 = 0.99$, $l_1 = 201.5$ mm, $l_2 = 200.0$ mm, $l_3 = 1.5$ mm, $\alpha = 17.3\%$ 。图 4(a)为模拟得到的待测油的折射率分别为 1.4726、1.47262、1.47264、1.47266、1.47268、1.4727 时接收到的光谱。可以看出在 1250 nm 到 1650 nm 范围内, 大约有 3 个峰, 每个峰的对比度约 9 dB, 且峰随着待测油折射率的升高向长波方向漂移。图 4(b)为 1550 nm 附近峰的中心波长随待测油折射率的变化。可以看出, 峰的中心波长随油的折射率呈线性变化, 具有较好的线性度(0.9998), 且具有较高的灵敏度 35418.8 nm/RIU。探测器为光谱仪, 分辨率为 0.02 nm, 那么用提出的光纤迈克尔逊干涉仪结构测量折射率最小分辨率 $0.02/35418.8 = 5.6 \times 10^{-7}$, 即分辨率小于 0.000001 RIU。

4. 结论

对于同一种油品, 例如油中含杂质量不同, 或重复加热, 其折射率会相应的改变, 用光纤迈克尔逊干涉仪进行检测时表现为光谱中峰的中心波长的变化。因此, 以已知的合格产品作为标准, 就可以快速知道某种食用油是否有掺假、不达标的情况。

本文检测方法原理简单, 精度高, 为食用油品质的检测或地沟油的快速鉴别提供了一种简便、实用的方法。

基金项目

大学生创新创业训练计划项目, 201610060045。

参考文献 (References)

- [1] 黄伟, 郑建军, 徐建华. 地沟油的安全快速检测研究[J]. 山东科技大学学报, 2010, 29(3): 51-53.
- [2] 胡欣宇. 基于电导率法的地沟油含量测定[J]. 物联网技术, 2017, 7(5): 26-31.
- [3] 杨洁, 黄海深, 李阳军. 基于互补金属氧化物半导体的高精度地沟油检测计[J]. 食品与机械, 2016, 32(9): 44-48.
- [4] Li, J.S. (2010) Optical Parameters of Vegetable Oil Studied by Terahertz Time-Domain Spectroscopy. *Applied Spectroscopy*, **64**, 231-234. <https://doi.org/10.1366/000370210790619663>
- [5] Wu, Z., Li, H. and Tu, D.W. (2015) Application of Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectroscopy Combined with Chemo Metrics for Analysis of Rapeseed Oil Adulterated with Refining and Purificating Waste Cooking Oil. *Food Analytical Methods*, **8**, 2581-2587. <https://doi.org/10.1007/s12161-015-0149-z>
- [6] 李昊, 陈明惠. 荧光光谱分析法在地沟油鉴别中的应用研究[J]. 激光生物学报, 2014, 23(5): 472-476.

- [7] 张丙芳, 苑立波, 孔庆明, 等. 近红外光谱技术快速鉴别地沟油与使用植物油的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(10): 2723-2727.
- [8] 庄俊域, 冯志强, 林丹, 等. 综合指标评价餐厨废油脂的研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(14): 127-130.
- [9] Fukuta, M., Yanagisawa, T., Miyamura, S. and Ogi, Y. (2004) Concentration Measurement of Refrigerant/Refrigeration Oil Mixture by Refractive Index. *International Journal of Refrigeration*, 27, 346-352.
- [10] 石亚新, 葛武鹏, 吴小勇, 等. 地沟油甄别检测技术研究进展[J]. 食品科学, 2016, 37(7): 276-281.
- [11] 花世群, 骆英, 洪云. 基于等厚干涉原理的液体折射率测量方法[J]. 中国激光, 2006, 33(11): 1542-1546.
- [12] 张浩, 陈明惠, 田甜, 项华中, 郑刚. 食用油折射率的光干涉快速测量方法[J]. 光学仪器, 2017, 39(1): 1-5.
- [13] 姚建永, 张森, 王臻, 周琦, 刘孟华. 光纤迈克尔逊干涉仪的理论与应用分析[J]. 仪表技术与传感器, 2007(5): 23-25.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7567, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: app@hanspub.org