

激光与光电子学进展

基于正交反射多次旋光效应的葡萄糖浓度传感研究

李栋宇^{1,2*}, 黄贞^{1,2}, 李超旋², 张正贺², 张婷婷², 徐兵², 金肖², 王邓¹, 刘旭萍¹, 李清华¹, 郑剑虹¹¹广东省特殊儿童发展与教育重点实验室, 广东 湛江 524048;²岭南师范学院物理科学与技术学院, 广东 湛江 524048

摘要 糖度检测在生物、医疗等领域具有关键作用。为了提高旋光法测量糖溶液浓度的分辨率, 本文提出利用正交反射镜消除偏振光被金属平面镜反射后的消旋光现象, 建立了参考臂和测量臂信号的相位差与溶液浓度之间的函数关系, 并研究了正交反射多次旋光效应。在不增加样品长度的前提下, 通过多次旋光使分辨率倍增。以葡萄糖溶液为例, 四次旋光的实验结果表明: 在 0~0.4690 g/mL 范围内, 浓度测量分辨率为 8×10^{-6} g/mL, 最大测量相对误差小于 0.54%。正交反射多次旋光检测技术可以为血糖与自闭症发病机理研究提供实时在线血糖检测。

关键词 光谱学; 旋光法; 正交反射; 多次旋光; 葡萄糖浓度

中图分类号 TH741

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2130001

Glucose Concentration Sensing Based on Orthogonal Reflection Multiple Polarization Rotation Effect

Li Dongyu^{1,2*}, Huang Zhen^{1,2}, Li Chaoxuan², Zhang Zhenghe², Zhang Tingting², Xu Bing², Jin Xiao², Wang Deng¹, Liu Xuping¹, Li Qinghua¹, Zheng Jianhong¹¹Guangdong Key Laboratory of Development and Education for Special Needs Children,

Zhanjiang 524048, Guangdong, China;

²School of Physics Science and Technology, Lingnan Normal University, Zhanjiang 524048, Guangdong, China

Abstract Glucose concentration measurement is crucial in various fields, including biology and medicine. This study proposes an orthogonal mirror to eliminate the 180° flipping of the polarization that generally occurs following single reflections from a metallic mirror to enhance the resolution of the polarimetry for measuring glucose concentration. The relationship between the solution concentration and the phase difference of reference light and measurement light is established. Furthermore, the effect of multiple polarization rotation based on the orthogonal mirror is explored. Multiple polarization rotation increases the glucose concentration measurement resolution without increasing the sample length. Taking glucose solution as an example, the experimental results of four rotations demonstrate that the concentration measurement resolution is 8×10^{-6} g/mL in the range of 0–0.4690 g/mL with a maximum relative error of less than 0.54%. The proposed approach can be used for online and real-time glucose concentration detection for research on glucose abnormalities in the pathogenesis of autism spectrum disorders.

Key words spectroscopy; polarimetry; orthogonal reflection; multiple polarization rotation; glucose concentration

1 引言

糖度检测是食品分析技术的重要部分, 糖度是果实最主要的内部品质之一^[1-2]。而且人体血糖含量的检测对糖尿病的治疗和预防具有关键性的作用^[3-9]。

特别是孕妇体内和宫内高血糖增加了新生儿患自闭症的风险^[10], 研究表明, 新生儿低血糖也会使新生儿患自闭症风险增加三倍^[11]。维持整个孕期血糖控制以及针对新生儿低血糖的筛查对降低自闭症患病率风险具有重要作用。糖类物质具有旋光特征, 因此旋光法以其

收稿日期: 2022-07-18; 修回日期: 2022-08-05; 录用日期: 2022-08-19

基金项目: 广东省自然科学基金(2022A1515012448)、广东省普通高校重点科研平台和项目(2020ZDZX2055)、广东省普通高等院校人工智能和服务乡村振兴重点领域专项(2019KZDZX2008)、湛江市科技计划项目(2020A03003, 2021A05042)、岭南师范学院燕岭优秀青年教师培养计划资助项目(YL20200102)、广东省特殊儿童发展与教育重点实验室开放基金项目(TJ202001)

通信作者: *nanorainbows@163.com

快速、非接触、干扰小等特点被广泛应用于糖度检测。当一束线偏振光照射到葡萄糖溶液时,入射光的偏振方向会沿传播方向发生旋转,称为旋光现象^[12]。透射光的偏振方向与入射时的方向形成了一定角度,即为旋光角。旋光角与糖浓度相关,为了提高糖度测量的分辨率,最直接的方法是增加样品长度。但该方法限制了其在微流体、微量样品等方面的应用,特别是通过眼前房水间接测量血糖浓度。为此,Xu等^[13]利用光栅将偏振旋转传递给直线运动的光斑,通过线阵图像传感器定位光斑位移来检测旋光角,该方法具有无机械旋转装置,但可测量最小旋光角仅为 $30'$ 。Ma等^[14]采用像素化偏振相机和Stokes参数提取旋光角,分辨率达到 6×10^{-6} ,然而该技术需要进行复杂的图像处理。Bornhop和Hankins^[15]使用来自微流体通道的背向反射条纹图样,Rajan和Ghosh^[16]利用棱镜阵列测量来自两个圆偏振光束的折射角之间的差异,在不增加光程的情况下将灵敏度提高到mM范围。最近,本课题组结合电机调制检偏器,通过双光路同步检测将糖度变化引起的旋光角变化转化为两路调制信号的相位差变化,浓度测量分辨率约为 0.0256% ^[17]。但是,上述几种方法测量灵敏度的提高受到样品长度的限制。许婷等^[18]利用法拉第旋光效应,通过增大磁感应强度增大旋光角,提高糖度测量灵敏度。然而该方法需要将样品放置在磁场中,增大了仪器的体积和测量的复杂性。Xu等^[19]将葡萄糖特殊氧化前后的旋光角变化与微弱检测相结合,获得了约 2.71 mg/L 的测量分辨率。然而该方法需要对葡萄糖进行预处理,采用实时闭环的双波长偏振系统并结合光谱域和时域低相干干涉法,因而具有较高的灵敏度^[20-22],可应用于确定血糖浓度,但需要太多的光学设备,系统过于复杂。外差式旋光仪^[23]和基于内反射的旋光仪^[24]结构紧凑且简单,但是它们的分辨率低至 $10^{-2} (\text{°})/\text{mm}$ 。在不增加样品长度和仪器体积的前提下,通过多次反射实现光程倍增是最直接的提高测量分辨率的方法,然而偏振光在金属平面镜反射后发生偏振 180° 翻转的消旋光效应,限制了多次反射在旋光仪中的应用。为此,本文利用正交反射镜,在不增加样品长度的前提下,分析了线偏振光偏振方位角与正交多次反射次数之间的函数关系,建立了参考臂和测量臂信号的相位差与溶液浓度之间的函数关系,并研究了正交反射多次旋光仪,实现了高精度偏振旋光角检测并应用于葡萄糖溶液浓度测量,从而提高了旋光法测量糖度的分辨率。

2 基本原理

2.1 线偏振光被正交反射镜反射时的偏振方位角分析

为了使光往返经过溶液而不产生消旋光效应,本文设计了镜面相互垂直且交线垂直于入射面的正交反射镜结构,如图1所示。入射光被金属反射镜反射时

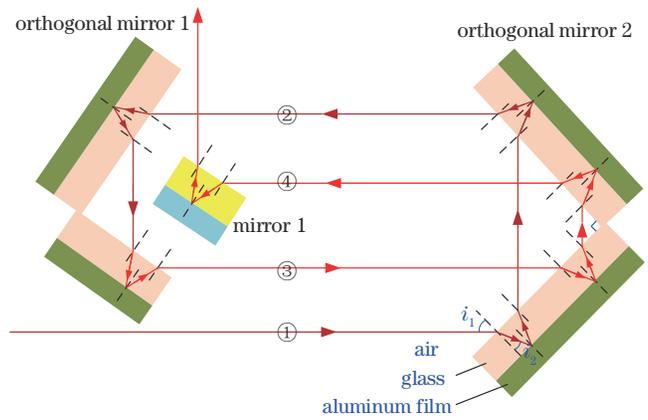


图1 正交反射镜结构示意图

Fig. 1 Schematic of orthogonal mirror structure

经过的介质分别为空气-玻璃-铝膜-玻璃-空气。由于光在空气-玻璃界面的反射较玻璃-铝膜界面的反射率低一个数量级,因此忽略空气-玻璃界面的反射光,主要考虑玻璃-铝膜界面的反射光。设入射线偏振光的偏振方位角为 φ ,将电矢量分解平行于垂直入射面的 p 分量和 s 分量。使 p 分量、 s 分量和波矢 k 构成右手系,图2中所有分量方向仅规定各个右手系的正方向,不代表某电矢量的实际物理过程。如图2所示, E_p 、 R_p 和 D_p 为入射光、反射光和折射光电矢量的平行分量, E_s 、 R_s 和 D_s 为入射光、反射光和折射光电矢量的垂直分量。根据菲涅耳公式可得:

$$\frac{R_s}{E_s} = -\frac{\sin(i_1 - i_2)}{\sin(i_1 + i_2)}, \quad (1)$$

$$\frac{R_p}{E_p} = \frac{\tan(i_1 - i_2)}{\tan(i_1 + i_2)}, \quad (2)$$

$$\frac{D_s}{E_s} = \frac{2\sin i_2 \cos i_1}{\sin(i_1 + i_2)}, \quad (3)$$

$$\frac{D_p}{E_p} = \frac{2\sin i_2 \cos i_1}{\sin(i_1 + i_2) \cos(i_1 - i_2)}. \quad (4)$$

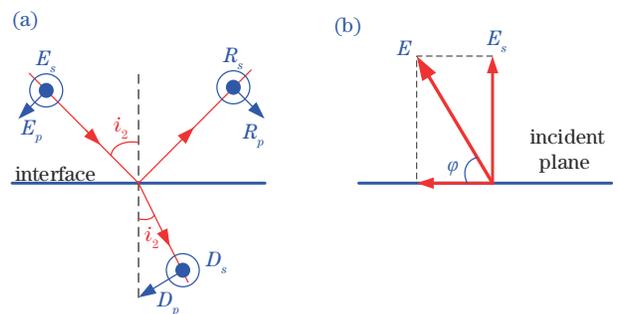


图2 偏振分量示意图。(a)入射光、折射光和反射光;
(b)入射光在入射面处的偏振分量

Fig. 2 Schematic of polarization components. (a) Incident light, refracted light, and reflected light; (b) polarization components of incident light at the incident plane

对于线偏振光, E_s 、 R_s 和 φ 的关系表示为 $E_s = E \sin \varphi$ 和 $E_p = E \cos \varphi$ 。则入射光从空气进入玻璃的折射光线

的偏振方位角满足:

$$\tan \varphi_{01} = \frac{D_s}{D_p} = \cos(i_1 - i_2) \tan \varphi_0. \quad (5)$$

被金属表面反射时,反射光的偏振方位角满足下式,

$$\tan \varphi_{11} = P \exp(-i\Delta) \tan \varphi_{01} \approx -P \tan \varphi_{01}, \quad (6)$$

式中: $P=r_s/r_p$, r_s 和 r_p 为垂直分量和平行分量的反射系数绝对值,由于所选择的反射镜并不是理想镀铝反射镜,取 $P=0.93$; $\Delta=\phi_s-\phi_p$, ϕ_s 和 ϕ_p 分别为垂直分量和平行分量的相位变化。一般地,线偏振光经过铝膜反射时, $\Delta=0$ ^[25-28]。

接着,光从玻璃折射入空气,出射光的偏振方位角满足:

$$\tan \varphi_{12} = \frac{D_s}{D_p} = \cos(i_2 - i_1) \tan \varphi_{11}. \quad (7)$$

令 $B=-P\cos^2(i_2-i_1)$,则由式(5)~(7)可得:

$$\varphi_{12} = \text{atan}(B \tan \varphi_0). \quad (8)$$

由此可得,偏振光经过溶液 n 次后,出射光的偏振方位角满足下式,

$$\varphi_n = \text{atan}(B^2 \tan \varphi_{n-1}) + \beta_s, \quad (9)$$

$$\varphi_1 = \varphi_0 + \beta_s, \quad (10)$$

式中: φ_0 为线偏振光进入样品之前的偏振方位角; β_s 为

线偏振光经过样品一次所引起的旋光角; φ_1 为线偏振光第一次经过样品后的偏振方位角。

最后出射光被平面镜 1 反射到检偏器上,此时反射光的偏振方位满足:

$$\varphi_{np} = \text{atan}\left\{B \tan\left\{\text{atan}\left[B^2 \tan(\varphi_{n-1})\right] + \beta_s\right\}\right\}. \quad (11)$$

2.2 正交反射多次旋光的葡萄糖溶液浓度测量原理

结合上述分析,基于正交反射镜的多次旋光葡萄糖溶液浓度测量原理图如图 3 所示,线偏振光经分光镜分为 a 和 b 两束光, a 光直接经检偏器后由光电传感器(光电池 1)检测其光强 I_a , 为参考臂信号。利用正交反射镜使 b 光多次经过样品后,再经检偏器由光电传感器(光电池 2)检测其光强 I_b , 为测量臂信号。设检偏器旋转频率为 f , 则根据马吕斯定律, I_a 和 I_b 分别表示为

$$I_a = E_a^2 \cos^2(\varphi_{0p} + 2\pi ft) = \frac{E_a^2}{2} \cos(2\varphi_{0p} + 4\pi ft) + \frac{E_a^2}{2}, \quad (12)$$

$$I_b = E_b^2 \cos^2(\varphi_{np} + 2\pi ft) = \frac{E_b^2}{2} \cos(2\varphi_{np} + 4\pi ft) + \frac{E_b^2}{2}, \quad (13)$$

式中: φ_{0p} 为 a 路光照到检偏器时的偏振方位角,当光路确定后,为一常数。

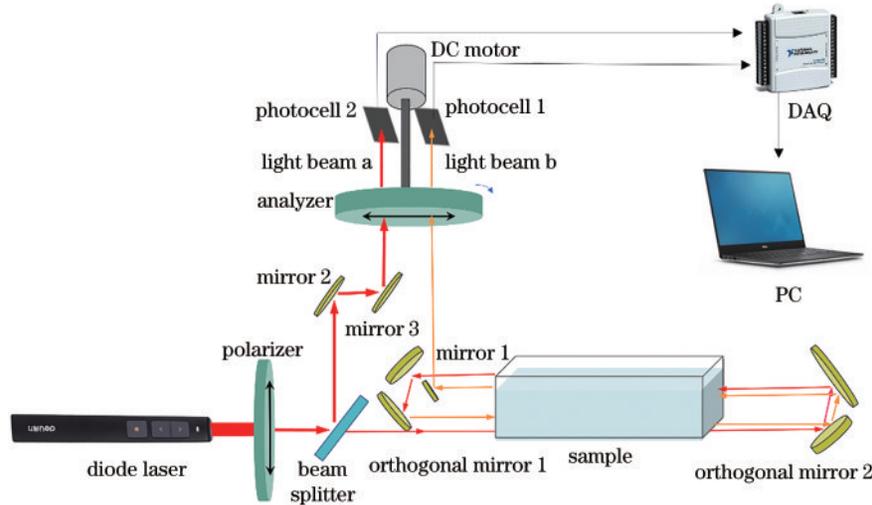


图 3 正交反射多次旋光糖度测量原理示意图

Fig. 3 Principle diagram of orthogonal reflection multiple polarization for glucose concentration measurement

则光电传感器获得的两路信号的相位差为

$$\psi_n = 2(\varphi_{0p} - \varphi_{np}). \quad (14)$$

以四次旋光为例($n=4$, n 为旋光次数),令 $\varphi_0=0$ 。当入射角 $i_1=45^\circ$,空气、玻璃和铝膜折射率分别为 1.0、1.5 和 1.44(1+3.63j)时^[28],研究参考臂和测量臂两路信号的相位差 ψ_n 随一次旋光角 β_s 的变化关系。当 $\psi_n > \pi$ 时,需要对测量的相位进行解卷处理。如图 4 所示,相位差 ψ_n 随一次旋光角 β_s 单调递增,则有

$$\psi_n = 2n\beta_s + \psi_0, \quad (15)$$

式中: ψ_0 为两路信号的初始相位差,当光路固定时,为一常数。

对于具有旋光性的溶液(如葡萄糖溶液),当其他实验条件不变时,线偏振光经过样品一次产生的旋光角 β_s 正比于光在溶液中所经过路程的长度 L 和旋光性溶质的浓度 C ,即 $\beta_s = \alpha LC$ 。其中, α 为比旋光率,当温度与入射光波长不变时,为一常数。因此,光电传感器获得的两路信号的相位差为

$$\psi_n = 2n\alpha LC + \psi_0. \quad (16)$$

令 $A=2\alpha L$,当样品长度 L 保持不变时, A 为一常

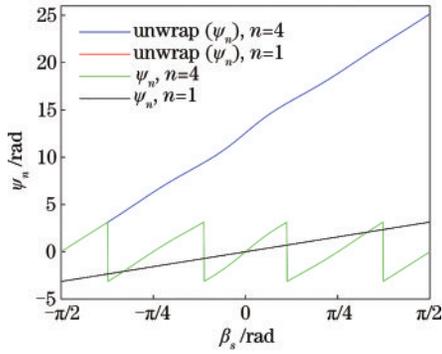


图 4 参考臂和测量臂信号的相位差 ψ_n 随一次旋光角 β_s 的变化关系 ($\psi_0=0$)

Fig. 4 Relationship between phase difference ψ_n of reference arm and measurement arm signal with the primary rotation angle β_s

数,则两路信号的相位差为

$$\psi_n = nAC + A_0, \quad (17)$$

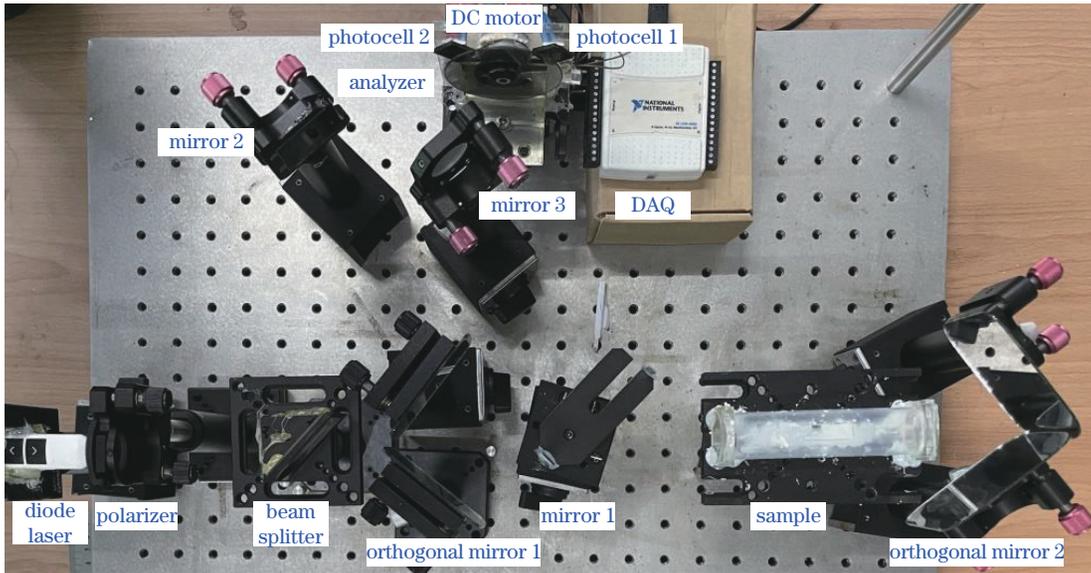


图 5 正交反射多次旋光糖度测量装置实物图

Fig. 5 Physical diagram of orthogonal reflection multiple polarization for glucose concentration measurement

3.1 溶液制备

样品规格如下:本实验的样品为葡萄糖溶液,溶质为“一家亲”葡萄糖粉(一水葡萄糖),溶剂为纯净水,配制质量浓度分别为 0.0000、0.0509、0.1038、0.1594、0.2159、0.2754、0.3374、0.4018、0.4690 g/mL 的葡萄糖溶液。

3.2 四次旋光实验结果与讨论

1) 参数标定

不同标准浓度下测量得到的相位差 ψ_n , 如表 1 所示。利用最小二乘法线性拟合得到相位差 ψ_n 与参考浓度 C 的函数关系如图 6 所示。可得四次旋光时, 相位差 ψ_n 与溶液浓度 C 的函数关系为

$$\psi_n = 251.95C + 15.077. \quad (18)$$

由式(18)可得,待测量糖溶液浓度与两路信号的

式中: A_0 为常数。

因此可以利用式(17)实现 n 次旋下的溶液浓度的测量。

3 实验结果与讨论

实验装置如图 5 所示,选择半导体激光笔(功率小于 1 mW, 波长为 650 nm)作为光源,由于半导体激光器出射光为椭圆偏振光,因此在其前方放置一起偏器,以保证入射光为线偏振光。分光镜用于将入射光分束为 a、b 两路光,其中 a 路光被平面镜 2 和平面镜 3 反射后直接照射到检偏器,b 两路经过正交反射镜和样品后被平面镜 1 反射照射到检偏器。检偏器由直流电机带动以恒定速度旋转。光电池 1 和光电池 2 分别采集 a、b 两路光的光强信号,并利用 NI-USB6009 数据采集卡(DAQ)采集后由计算机处理。实验时样品长度为 0.092 m,环境温度为 25 °C。

表 1 不同浓度对应的相位差 ψ_n

Table 1 Phase difference ψ_n corresponding to different concentrations

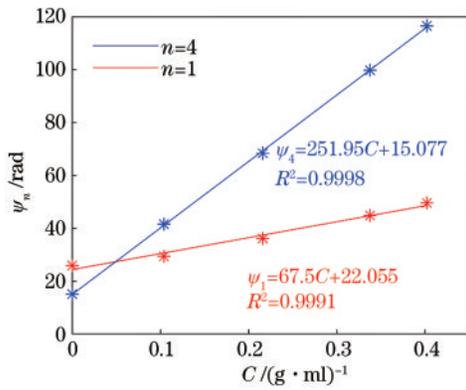
$C / (\text{g} \cdot \text{mL}^{-1})$	$\psi_1 / (^\circ)$	$\psi_4 / (^\circ)$
0.0000	25.8814	15.0903
0.1038	29.3788	41.5116
0.2159	36.1355	68.3534
0.3374	44.7721	99.7545
0.4018	49.5739	116.5419

相位差关系为

$$C = (\psi_n - 15.077) / 251.95. \quad (19)$$

2) 糖溶液浓度测量

根据上述标定结果,利用式(19)对质量浓度分别为 0.0509、0.1594、0.2757、0.3374、0.4690 g/mL 的糖

图6 相位差 ψ_n 与参考溶液浓度 C 的线性拟合曲线Fig. 6 Linear fitting curves between phase difference ψ_n and solution concentration C

溶液进行检测,测量结果如表2所示。在低糖度段(如0.0509 g/mL),一次旋光的测量相对误差约为11.4263%,四次旋光的测量相对误差约为0.3929%,因此在低糖度段测量相对误差明显减小。在0~0.4690 g/mL范围内,四次旋光的最大相对误差小于0.54%。由图6可知,一次旋光的比例系数 $A=67.5$ 。四次旋光的比例系数 $A=251.95$,是一次旋光的3.73倍,测量灵敏度得到显著提高。

根据式(19)可知,设定直流电机转速为10 r/min、

每通道采样率30 kSa/s,则相位差测量分辨率为 0.002° ,对应的浓度测量分辨率为 8×10^{-6} g/mL。四次旋光与一次旋光对比实验结果表明:在不增加样品长度的前提下,通过正交反射镜结构,消除了偏振光被金属平面镜反射后的消旋光现象,从而可以通过增加偏振光经过样品溶液的次数提高溶液浓度的测量分辨率。浓度测量分辨率为 8×10^{-6} g/mL(4.44×10^{-2} mmol/L),表明在接近人体生理血糖的样品中可以很好地检测葡萄糖,因此所提出的传感器具有较高的可行性。另一方面,所提出的正交多次旋光糖度测量传感器的高灵敏度 and 较大线性范围将适用于研究其他化学反应和容易发生旋光变化的分子间相互作用,例如蛋白质、核酸、氨基酸和多糖。

Chen等^[29]使用共径外差激光干涉光学传感器测量糖度,在40~500 mg/dl范围内达到了1.41 mg/dl的测量分辨率。与之对比,该方法需要设计专门的传感探头,本文方法光路更简单,操作更便捷。Xu等^[19]提出光学弱测量传感器和葡萄糖特异性检测葡萄糖的方法,相比四次旋光法,虽然其测量分辨率增大约3倍,但是不需要对样品进行预处理,可实现实时在线检测。而且进一步增加旋光次数、选择更高采样率进行信号采集、更低的电机转速可以非常便捷地提高测量系统的浓度测量分辨率。

表2 葡萄糖溶液浓度测量的相对误差

Table 2 Relative errors of the glucose concentration measurement

Reference concentration $C_{r1} / (\text{g} \cdot \text{mL}^{-1})$	Measurement concentration $C_{m1} / (\text{g} \cdot \text{mL}^{-1})$	Relative error $E_{m1} / \%$	Measurement concentration $C_{m4} / (\text{g} \cdot \text{mL}^{-1})$	Relative error $E_{m4} / \%$
0.0509	0.0567	11.4263	0.0511	0.3929
0.1594	0.1523	4.4029	0.1598	0.2946
0.2754	0.2810	2.0334	0.2740	0.5315
0.3374	0.3365	0.4149	0.3361	0.3828
0.4690	0.4688	2.0895	0.4714	0.5204

4 结 论

为了提高旋光法测量溶液浓度的分辨率,本文利用正交反射镜消除了偏振光被金属平面镜反射后的消旋光现象。在不增加样品长度的前提下,分析了线偏振光偏振方位角与正交多次反射次数之间的函数关系,建立了参考臂和测量臂信号的相位差与溶液浓度之间的函数关系,并研究了正交反射多次旋光仪。以四次旋光葡萄糖溶液浓度测量为例,实验结果表明:在0~0.4690 g/mL范围内,浓度测量分辨率为 8×10^{-6} g/mL,最大测量相对误差小于0.54%。基于正交反射的多次旋光检测技术具有测量分辨率高、结构简单等特点,可实现实时在线的糖溶液浓度检测,有望为宫内高血糖或新生儿低血糖与自闭症发病机理研究提供可靠的血糖浓度检测装置。

参 考 文 献

- [1] Wu B F, Xu H T, Shi Y F, et al. Microelectrode glucose biosensor based on nanoporous platinum/graphene oxide nanostructure for rapid glucose detection of tomato and cucumber fruits[J]. Food Quality and Safety, 2022, 6: fyab030.
- [2] Yeganeh-Zare S, Farhadi K, Amiri S. Rapid detection of apple juice concentrate adulteration with date concentrate, fructose and glucose syrup using HPLC-RID incorporated with chemometric tools[J]. Food Chemistry, 2022, 370: 131015.
- [3] Bolla A S, Priefer R. Blood glucose monitoring- an overview of current and future non-invasive devices[J]. Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews, 2020, 14(5): 739-751.
- [4] 郭帅, 苏杭, 黄星灿, 等. 光学无创血糖浓度检测方法的研究进展[J]. 中国光学, 2019, 12(6): 1235-1248.

- Guo S, Su H, Huang X C, et al. Research progress in optical methods for noninvasive blood glucose detection [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(6): 1235-1248.
- [5] Cescon I, Stefanel A. Polarimetry measurement in a physics lab for food science undergraduate students[J]. *The Physics Teacher*, 2022, 60(2): 144-148.
- [6] Villena Gonzales W, Mobashsher A T, Abbosh A. The progress of glucose monitoring—a review of invasive to minimally and non-invasive techniques, devices and sensors[J]. *Sensors*, 2019, 19(4): 800.
- [7] 张洋, 何腾超, 刘林, 等. 基于离散三维荧光光谱的糖尿病识别方法研究[J]. *光学学报*, 2022, 42(1): 0117002. Zhang Y, He T C, Liu L, et al. Diabetes recognition method based on discrete three-dimensional fluorescence spectrum[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(1): 0117002.
- [8] 叶思放, 方云团. 基于 Parity-Time 对称耦合微腔的血糖传感器[J]. *中国激光*, 2022, 49(3): 135-142. Ye S F, Fang Y T. Blood glucose sensor based on parity-time symmetry coupled cavities[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(3): 135-142.
- [9] 刘静, 房晓峰, 袁振, 等. 有机纳米光学传感器及血糖定量成像研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(15): 1507403. Liu J, Fang X F, Yuan Z, et al. Quantitative imaging of blood glucose concentration by organic nanoparticle transducer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(15): 1507403.
- [10] Hoirisch-Clapauch S, Nardi A E. Autism spectrum disorders: let's talk about glucose? [J]. *Translational Psychiatry*, 2019, 9: 51.
- [11] Buchmayer S, Johansson S, Johansson A, et al. Can association between preterm birth and autism be explained by maternal or neonatal morbidity? [J]. *Pediatrics*, 2009, 124(5): e817-e825.
- [12] Bungay A R, Svirko Y P, Zheludev N I. Equivalency of the Casimir and the Landau-Lifshitz approaches to continuous-media electrodynamics and optical activity on reflection[J]. *Physical Review B*, 1993, 47(18): 11730-11735.
- [13] Xu Q F, Cai X W, Tang Y Q, et al. A grating to transfer polarization rotation to straight line movement—designs and applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(22): 10419-10424.
- [14] Ma X, Dong F L, Zhang Z G, et al. Pixelated-polarization-camera-based polarimetry system for wide real-time optical rotation measurement[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 283: 857-864.
- [15] Bornhop D J, Hankins J. Polarimetry in capillary dimensions[J]. *Analytical Chemistry*, 1996, 68(10): 1677-1684.
- [16] Rajan R P, Ghosh A. Enhancement of circular differential deflection of light in an optically active medium[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(7): 1232-1234.
- [17] 黄贞, 梁恩恩, 林雪桂, 等. 基于液体旋光效应的葡萄糖浓度测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(6): 061203. Huang Z, Liang E E, Lin X G, et al. Glucose concentration measurement based on liquid optical rotation effect[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(6): 061203.
- [18] 许婷, 彭玉峰, 韩雪云. 基于法拉第旋光效应的葡萄糖浓度传感研究[J]. *光电子·激光*, 2021, 32(2): 173-180. Xu T, Peng Y F, Han X Y. Research on glucose concentration sensing based on Faraday rotation effect[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2021, 32(2): 173-180.
- [19] Xu Y, Shi L X, Guan T, et al. Specific detection of glucose by an optical weak measurement sensor[J]. *Biomedical Optics Express*, 2021, 12(8): 5128-5138.
- [20] Malik B H, Pirmstill C W, Coté G L. Dual-wavelength polarimetric glucose sensing in the presence of birefringence and motion artifact using anterior chamber of the eye phantoms[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2013, 18(1): 017007.
- [21] 余振芳, 邱琪, 张天航, 等. 双调制多波长旋光法检测人工前房内葡萄糖的浓度[J]. *光学学报*, 2016, 36(11): 1117003. Yu Z F, Qiu Q, Zhang T H, et al. Dual-modulation multi-wavelength polarimetry for monitoring glucose concentration in anterior chamber of eye phantoms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 1117003.
- [22] Liu C J, Li T Q, Akkin T. Low-coherence interferometry for phase-sensitive measurement of optical rotation[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(20): 5893-5898.
- [23] Lo Y L, Liao C C, Li C Y, et al. Measuring the optical rotation angle and circular dichroism of anisotropic optical media using a heterodyne polarimeter[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(8): 1255-1262.
- [24] de Oliveira A R, Domenegueti J F M, Zilio S C. Measuring optical activity with the internal reflection in a glass prism[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(4): 937-941.
- [25] 徐林华, 李相银, 徐福龙. 线偏振光反射时的偏振态分析[J]. *重庆工学院学报(自然科学版)*, 2007, 21(7): 70-73. Xu L H, Li X Y, Xu F L. Polarization analysis on reflection of linearly polarized light[J]. *Journal of Chongqing Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 2007, 21(7): 70-73.
- [26] 陈立刚, 洪津, 乔延利, 等. 非理想正交反射镜消偏性能的模拟研究[J]. *应用光学*, 2008, 29(4): 633-638. Chen L G, Hong J, Qiao Y L, et al. Simulation study on depolarization for imperfect orthogonal mirrors[J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(4): 633-638.
- [27] Born M, Wolf E. Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light [M]. Oxford: Pergamon Press, 1999.
- [28] 邱成锋. 金属反射镜的偏振特性及其正交反射消偏研究[D]. 合肥: 中国科学院合肥物质科学研究院, 2007: 15-49. Qiu C F. Polarization characteristics of metal mirror and its orthogonal reflection depolarization[D]. Hefei: Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, 2007: 15-49.
- [29] Chen K H, Hsu C C, Su D C. Interferometric optical sensor for measuring glucose concentration[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(28): 5774-5776.