

基于量子弱测量的高分辨氨基酸种类识别

罗朝明^{1,2*}, 唐鹏², 张勇², 万婷², 邓艳¹, 张景贵¹¹湖南第一师范学院物理与化学学院, 湖南长沙 410205;²湖南理工学院信息科学与工程学院, 湖南岳阳 414006

摘要 提出和实验论证了基于量子弱测量系统的高分辨氨基酸种类识别方案,并探究了分辨率的提升规律。该量子弱测量系统利用氨基酸溶液的旋光角充当系统的后选择角,将放大后的光自旋霍尔效应位移作为探针识别氨基酸的种类,通过改变入射角可以提升该系统对旋光角的分辨率。通过合理设计BK7-介质结构界面,使其分辨率比单纯BK7玻璃界面有两个数量级的提升,可达 $9.7 \times 10^{-6} (^{\circ})/\mu\text{m}$ 。这些研究将为氨基酸种类的高精度识别提供理论基础,并拓展量子弱测量的应用范围。

关键词 量子光学; 量子弱测量; 氨基酸种类; 光自旋霍尔效应位移

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2227001

High-Resolution Identification of Amino Acid Species Based on Quantum Weak Measurement

Luo Zhaoming^{1,2*}, Tang Peng², Zhang Yong², Wan Ting², Deng Yan¹, Zhang Jinggui¹¹School of Physics and Chemistry, Hunan First Normal University, Changsha 410205, Hunan, China;²School of Information Science and Engineering, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, Hunan, China

Abstract A high-resolution scheme for identifying amino acid species on the basis of the quantum weak measurement system is proposed and experimentally demonstrated, and the improvement laws of resolution are explored. In this system, the optical rotation angle of the amino acid solution is taken as the post-selection angle, and the amplified optical spin Hall shifts act as a probe to identify the amino acid species. The resolution of the system for the optical rotation angle can be improved by incident angle adjustment. The proper design of the BK7-dielectric structure interface can make the resolution reach $9.7 \times 10^{-6} (^{\circ})/\mu\text{m}$, with an improvement of two orders of magnitude over that of the pure BK7 glass interface. These studies can provide a theoretical basis for the high-precision identification of the amino acid species and expand the application range of quantum weak measurement.

Key words quantum optics; quantum weak measurement; amino acid species; optical spin Hall shifts

1 引言

氨基酸作为合成脏器、酶、免疫抗体所需的成分,是人体生命活动的必需物质^[1-2]。不同种类的氨基酸在人体内所承担的功能也各不相同,如脯氨酸维持皮肤和结缔组织的生长,丝氨酸用于脂肪和脂肪酸的新陈代谢^[3-4]。鉴于氨基酸对人类成长发育的重要性,其种类的识别显得尤为重要。实验室常用的氨基酸识别方法主要包括纸层析法、茚三酮法、等点电位法等^[5-7],

但是这些方法在识别的过程中会破坏样本。为了避免样品的破坏,研究者提出利用旋光法识别氨基酸种类的方法,该方法具有非侵入、简单的优点^[8-9]。旋光法的实验室常用仪器是旋光计,由于偏振片消光比的限制以及相干光源的噪声干扰,它的旋光角测量精度小于 0.001° ^[10],较难满足高分辨氨基酸分子种类的识别要求。因此,有必要探索一种便捷、非侵入、高精度的氨基酸种类识别方案。

量子弱测量的出现为解决上述问题带来了新的契

收稿日期: 2022-03-29; 修回日期: 2022-04-19; 录用日期: 2022-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(62075060)、湖南省自然科学基金(2020JJ4033)、湖南省教育厅科学研究项目(20A218, 19A198)、湖南省研究生科研创新项目(CX20201143)

通信作者: *zhaomingluo@hnu.edu.cn

机,它由 Aharonov 等^[11]在 1988 年理论提出,通过引入近似正交的前、后选择态,可对微弱的信号进行几个数量级的放大,同时还可以对技术噪声进行抑制^[11-15]。由于量子弱测量系统具有非侵入、高精度、操作简单的优点,Hosten 等^[16-18]在 2008 年利用量子弱测量实验观测了由自旋轨道耦合引起的光自旋霍尔效应位移。将光自旋霍尔效应位移和量子弱测量系统有机结合,研究者们目前已经实现了石墨烯参数^[19-21]、纳米金属薄膜参数^[22-25]、生物分子折射率^[26-28]、溶液质量浓度^[29-31]等参数的高精度传感。本课题组也一直在从事光自旋霍尔效应位移的操控和该效应的增强研究,并基于量子弱测量实现了 Weyl 半金属晶格间距和化学反应动力学参数的高精度传感^[32-36],因此有理由相信量子弱测量系统可用于实现氨基酸种类的高分辨识别。

本文提出和实验论证一种基于量子弱测量系统的高分辨率识别氨基酸种类的方案,并探究了该系统对分辨率提升的规律。首先,固定入射角,基于量子弱测量系统,利用氨基酸的旋光性进行其种类的高分辨识别;然后,探索入射角改变对量子弱测量系统中氨基酸种类识别分辨率的影响;最后,进一步探究 BK7-介质结构设计对氨基酸种类识别分辨率的提升规律。

2 氨基酸修正的量子弱测量系统

氨基酸是合成蛋白质的原料,为生命体的新陈代谢提供了物质基础。旋光性是氨基酸的一个重要物理特征,当一束线偏振光通过质量浓度为 c 、长度为 l 的氨基酸溶液时,其偏振面会发生旋光角为 α 的偏转,旋

光角 α ^[30]可表示为

$$\alpha = l \cdot c \cdot [\alpha_\lambda^T], \quad (1)$$

式中: $[\alpha_\lambda^T]$ 代表比旋光度; λ 为偏振光的波长。不同种类的氨基酸具有不同的比旋光度,在固定质量浓度下表现出不同的旋光角,因此氨基酸的种类识别可通过监控旋光角来实现。为了识别氨基酸的种类,利用氨基酸的旋光性决定量子弱测量的后选择态,即旋光角充当系统后选择角,为此搭建了一套如图 1 所示的量子弱测量系统。该系统中,He-Ne 激光器 (1145P, Lumentum) 用于产生波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 的高斯光束。半波片 (HWP) 用于调节光束的光强,利用透镜 (Lens1) 对光束进行聚焦。聚焦后的光束经过格兰偏振棱镜 (GLP1) 进行水平线偏振态 $|H\rangle$ 的选择,生成所需要的前选择态^[16]:

$$|\psi_i\rangle = |H\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|+\rangle + |-\rangle), \quad (2)$$

式中: $|+\rangle$ 和 $|-\rangle$ 代表左旋、右旋圆偏振基底。接下来,从 GLP1 出射后的光束在 BK7-介质结构界面上反射。自旋轨道的相互作用引起光自旋霍尔效应位移,其初始位移为

$$\delta^H = \frac{(R_p + R_s) \cot \theta_i}{k_0 R_p}, \quad (3)$$

式中: θ_i 代表入射角; $k_0 = 2\pi/\lambda$ 代表真空中的波数; R_s 和 R_p 分别表示 BK7-介质结构界面垂直偏振和水平偏振的非涅耳系数,它们与 BK7-介质结构的介电常数、厚度等参数密切相关。

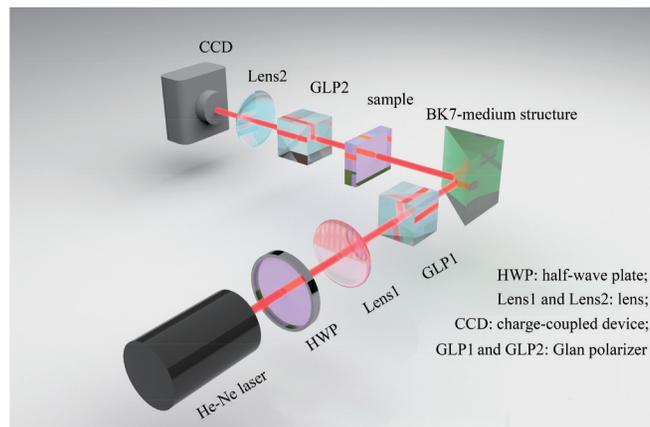


图 1 基于量子弱测量的氨基酸种类识别装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram for identifying amino acid species based on quantum weak measurement

该系统需要保证 GLP2 与 GLP1 绝对垂直,而有别于传统量子弱测量系统中 GLP2 与 GLP1 在垂直方向存在小夹角(即后选择角)。这时光束经过氨基酸溶液时,其偏振态得到旋光角大小为 α 的修正,并且后选择角 Δ 由旋光角 α 提供,即 $\Delta = \alpha$ 。这样氨基酸溶液与 GLP2 生成的后选择态为

$$|\psi_f\rangle = |V + \alpha\rangle = \frac{i}{\sqrt{2}} [\exp(i\alpha)|-\rangle - \exp(-i\alpha)|+\rangle], \quad (4)$$

式中: i 为虚数单位; $|V + \alpha\rangle$ 表示与垂直偏振方向成 α 角度的偏振态。经过前选择和后选择,光自旋霍尔效应位移被弱值放大。弱值 A_w 的表达式为

$$A_w = \frac{\langle \psi_f | \sigma_3 | \psi_i \rangle}{\langle \psi_f | \psi_i \rangle}, \quad (5)$$

式中: σ_3 是泡利算符。透镜 Lens2 的作用在于对光束进行准直,其与透镜 Lens1 组成共焦系统,该系统可对光自旋霍尔效应位移进行传播放大,传播放大的表达

式^[24]为

$$F = \frac{4\pi \langle y_{i,2}^2 \rangle}{(z_{\text{eff}} \lambda)}, \quad (6)$$

式中: F 为传播放大倍数; $\langle y_{i,2}^2 \rangle$ 和 z_{eff} 分别代表光束通过 Lens2 的横向空间分布和 Lens2 的有效焦距。经过弱值放大和传播放大后的光自旋霍尔效应位移 δ_w^H 可由 CCD (Coherent LaserCam HR) 直接测出, 其理论上的 δ_w^H 可表示为

$$\delta_w^H = \pm F |A_w| \delta = \pm \frac{z [R_s (R_p + R_s)] \sin(2\alpha) \cot \theta_i}{(R_p + R_s)^2 \cot^2 \theta_i \cot^2 \alpha + 2k_0 R_p^2 z_r \sin^2 \alpha}, \quad (7)$$

式中: z_r 表示瑞利距离; z 为传播距离。进一步分析发现, 式(7)已建立起放大后的光自旋霍尔效应位移与旋光角之间的定量关系, 从而可以得出氨基酸种类识别的大致思路。将系统测得的放大后光自旋霍尔效应位移作为探针, 由其可推算出氨基酸样品的旋光角, 进而根据式(1)计算出比旋光度, 最后通过查表确定识别的氨基酸种类。该系统对光自旋霍尔效应位移存在放大效果, 且具有高分辨率, 其分辨率 S 可定义为旋光角与放大后光自旋霍尔效应位移的变化率:

$$S = \frac{d\alpha}{d\delta_w^H}. \quad (8)$$

结合式(7)和(8)可知, 该量子弱测量系统的分辨率将受入射角以及菲涅耳系数的影响, 菲涅耳系数的改变可以通过设计 BK7-介质结构界面来实现。另外一个系统的重要指标是旋光角的标准不确定度 u ^[37], 可表示为

$$u = \sqrt{\frac{1}{pq} \sum_{j=1}^p \sigma_j^2}, \quad (9)$$

式中: p 表示测量样本组数; q 表示每组的重复测量次数; $\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{g=1}^q (a_g - \bar{a})^2}{(q-1)}}$ 表示第 j 组的实验标准偏差, 其中 a_g 代表第 g 次的旋光角实际测量值, \bar{a} 代表每组的测量平均值。因此, 后续的讨论将在通过实验论证氨基酸种类识别方案的同时, 测量分析系统的分辨率和不确定度, 理论仿真 BK7-介质结构界面设计对系统分辨率的提升规律。

3 实验与结果分析

通过实验论证如图 1 所示的量子弱测量系统对氨基酸种类高分辨识别的有效性, 并探究该系统分辨率的提升规律。该系统选取了 arginine (精氨酸)、alanine (丙氨酸)、serine (丝氨酸) 和 proline (脯氨酸) 作为氨基酸样品, 放置样品的光学长度 $l = 10 \text{ mm}$, 系统传播距离 $z = 250 \text{ mm}$ 。在接下来的讨论中, 在先固定入射角以及考虑最简单的单纯 BK7 玻璃界面的情况下, 分析探讨氨基酸种类高分辨识别方案, 然后探究入射角和 BK7-介质结构界面设计对该系统分辨率的提升规律。

首先考虑入射角固定为 $\theta_i = 45^\circ$ 以及 BK7-介质结

构界面仅为单纯 BK7 玻璃界面的情况, 通过实验论证基于量子弱测量系统的氨基酸种类高分辨识别方案。由理论部分的讨论可知, 该方案先由系统中的 CCD 测得放大后的光自旋霍尔效应位移, 接着计算出氨基酸溶液引起的旋光角和比旋光度, 从而可通过查氨基酸比旋光度表确定其种类^[38-39]。该方案的关键是建立起放大后的光自旋霍尔效应位移与氨基酸溶液旋光角之间的对应关系。为了弄清这一对应关系: 一方面从理论上仿真了如式(7)所示的放大后的光自旋霍尔效应位移与旋光角之间的定量关系, 如图 2(a) 中实线所示; 另一方面, 从实验上调整格兰偏振棱镜 GLP2, 利用其与 GLP1 小夹角形成的后选择角模拟方案中旋光角引起的后选择角, 得到了如图 2(a) 中点线所示的放大后光自旋霍尔效应位移与旋光角的对应关系。比较图 2(a) 中的实线和点线, 能发现理论分析和实验得到的两者的对应关系高度吻合, 而且在旋光角为 $-0.32^\circ \sim 0.32^\circ$ 范围内放大后光自旋霍尔效应位移与旋光角呈较好的线性关系, 其斜率 K 就是系统的测量灵敏度, $K = d\delta_w^H/d\alpha = 3508 \text{ } \mu\text{m}/(^\circ)$ 。由于观测放大后光自旋霍尔效应位移的 CCD 分辨率为 $1 \text{ } \mu\text{m}$, 根据系统的测量灵敏度, 该量子弱测量系统的分辨率 $S = 1/K = 2.85 \times 10^{-4} (^\circ)/\mu\text{m}$, 这高于传统旋光计一个数量级^[10]。为了评估该系统的测量结果, 取测量样本组数 $p = 6$ 以及每组的重复测量次数 $q = 5$, 在重复性条件下连续测量 5 次旋光角分别在 0.04° 、 0.08° 、 0.12° 、 0.16° 、 0.20° 、 0.24° 时放大后光自旋霍尔效应并根据图 2 中的线性关系计算旋光角测量值 a_g 和平均值 \bar{a} , 获得了相应的实验标准偏差 $\sigma_j =$

$\sqrt{\frac{\sum_{g=1}^5 (a_g - \bar{a})^2}{(q-1)}}$ 分别为 0.0029° 、 0.0039° 、 0.0026° 、 0.0034° 、 0.0039° 、 0.0047° 。进一步根据式(9), 得到了该系统旋光角的标准不确定度 $u =$

$\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^6 \sigma_j^2}{(pq)}} = 0.0015^\circ$, 这与传统旋光计处于同一数量级^[37]。基于前面提到的图 2(a) 中的线性关系, 能获得放大后的光自旋霍尔效应位移与旋光角的一一对应关系, 从而通过系统中 CCD 测得的放大后光自旋霍尔效应位移很好地推算出氨基酸溶液的旋光角, 进而获得比旋光度、确定氨基酸的种类。接下来选取精氨酸、丙氨酸、丝氨酸、脯氨酸作为样品, 探讨氨基酸种类识别的过程。图 2(b) 为这 4 种样品随质量浓度变化的放大后光自旋霍尔效应位移图, 为了对比氨基酸随质量浓度的变化, 对实验数据进行拟合处理。由图 2(b) 可以看到, 有三种氨基酸样品 (正方形线、五角星线和三角形线) 对应的放大后光自旋霍尔效应位移大小随质量浓度的增加呈线性增加, 另一种样品 (星线) 对应的放大后光自旋霍尔效应位移大小先随质量浓度的增加呈线性增加, 在质量浓度 $c \geq 0.05 \text{ g/mL}$ 后不再线性增加, 而呈缓慢减小的趋势。在线性关系范围内, 固定质量浓度条件下这 4 种氨基酸溶液有唯一对应的放大

后光自旋霍尔效应位移,在这里选取质量浓度均为 $c = 0.02 \text{ g/mL}$ 时,正方形线、五角星线、三角形线和星线所对应的放大后光自旋霍尔效应位移分别为 $85 \mu\text{m}$ 、 $6 \mu\text{m}$ 、 $-68 \mu\text{m}$ 和 $-540 \mu\text{m}$ 。结合图 2(a)中的线性关系,获得 4 种氨基酸的旋光角 $\alpha = \delta_w^H/K$ 约为 0.020° 、 0.002° 、 -0.019° 、 -0.154° 。再依据式(1)分别得出比旋光度 $[\alpha_d^T] = \alpha/(l \cdot c)$ 约为 12.1° 、 1.0° 、 -9.6° 、 -81.2° ,进一步通过查比旋光度表^[38]确定这 4

种样品种类分别为精氨酸、丙氨酸、丝氨酸和脯氨酸。同时发现星线在质量浓度 $c \geq 0.05 \text{ g/mL}$ 后不再发生线性变化的原因是它具有较高的比旋光度,它的旋光角超出了图 2(a)中的线性关系(即 $\alpha \geq 0.32^\circ$),这将给种类的识别带来较大的误差。重要的是,通过选用较小质量浓度 c 或减小样品长度 l ,较大比旋光度氨基酸的旋光角也将处于图 2(a)所示的线性关系,从而避免误差。

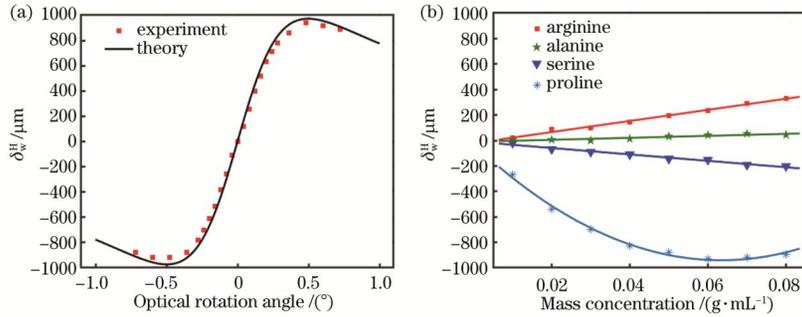


图 2 基于量子弱测量系统的氨基酸种类识别。(a)放大后光自旋霍尔效应位移与旋光角的对应关系;(b)放大后光自旋霍尔效应位移随氨基酸样品质量浓度的变化

Fig. 2 Identification of amino acid species based on weak measurement system. (a) Relationship between amplified spin Hall shift and optical rotation angle; (b) variation of amplified spin Hall shift with mass concentration of amino acid sample

然后探索不同入射角对量子弱测量系统中氨基酸种类识别分辨率的影响规律。由理论部分可知,分辨率与入射角密切相关。假定 4 种氨基酸样品的质量浓度均为 $c = 0.04 \text{ g/mL}$ (同种氨基酸的旋光角固定),由式(7)可知 $42^\circ \sim 50^\circ$ 范围内的入射角与放大后的光自旋霍尔效应位移呈近似线性关系[图 3(a)中实线],相应的实验数据如图 3(a)中离散点所示,实验与理论结果可以较好地吻合。从图 3(a)还可知道固定质量浓度条件下,氨基酸所对应的放大后的光自旋霍尔效应位移数值随入射角的减小而近似线性增加,从而由式(8)可以推断 $42^\circ \sim 50^\circ$ 范围内入射角的减小可以提升量子弱测量系统中氨基酸种类识别的分辨率。为了更清晰地探究入射角对系统分辨率的提升规律,固定

入射角为 $\theta_i = 42^\circ$,调整格兰偏振棱镜 GLP2,利用其与 GLP1 小夹角形成的后选择角模拟方案中旋光角引起的后选择角,从理论和实验两个方面获得了与图 2(a)一致的放大后光自旋霍尔效应位移随旋光角的变化关系[图 3(b)中点划线和方形点线],理论和实验结果高度吻合。进一步通过与图 2(a)比较可得出,放大后的光自旋霍尔效应位移随旋光角的线性变化范围较 $\theta_i = 45^\circ$ 变窄,但线性范围内的斜率有 30% 的提升,系统分辨率达到 $2 \times 10^{-4} (^\circ)/\mu\text{m}$ 。同时理论仿真了 $\theta_i = 47^\circ$ 和 $\theta_i = 50^\circ$ 时放大后的光自旋霍尔效应位移随旋光角的变化,如图 3(b)中实线和虚线所示。结合图 2(a)以及图 3(b)三种不同入射角的结果可以总结得出,系统分辨率可随入射角的减小而提高。

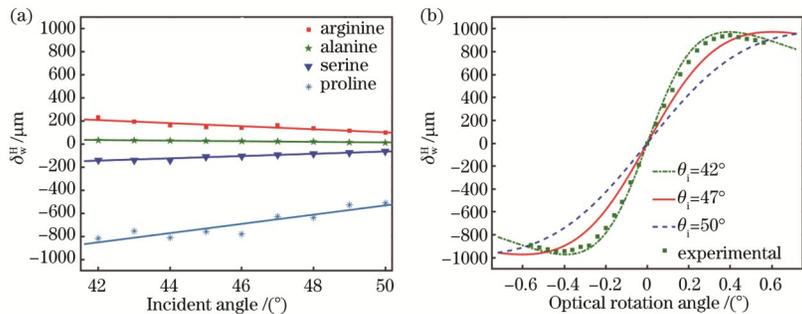


图 3 入射角对量子弱测量系统分辨率的影响。(a)氨基酸样品放大后光自旋霍尔效应位移随入射角的变化;(b)不同入射角下放大后光自旋霍尔效应位移随旋光角的变化

Fig. 3 Influence of incident angle on resolution of weak measurement system. (a) Variation of amplified spin Hall shift with incident angle for amino acid samples; (b) relationship between amplified spin Hall shift and optical rotation angle at different incident angles

最后,探究 BK7-介质结构界面设计对量子弱测量系统中氨基酸种类识别分辨率的提升规律。由前面理

论部分的分析可知,量子弱测量系统的分辨率除受入射角影响以外,还与 BK7-介质结构界面的菲涅耳系数

有关。本节前面讨论的 BK7-介质结构界面都是单纯的 BK7 玻璃界面,接下来的讨论中仅给 BK7 玻璃镀一层介质薄膜,用于探究结构界面设计对氨基酸识别分辨率的提升规律。需要说明的是,介质薄膜可通过磁控溅射技术制备金属合金薄膜来实现,其介电常数的实部和虚部可以通过设计不同退火温度、合金成分进行控制^[40-41],但精确制备的难度较大,因此本文仅通过理论分析介质结构设计对分辨率的提升规律。假定介质薄膜的介电常数为 ϵ ,厚度 $d=50\text{ nm}$,入射角 $\theta_i=45^\circ$,并以固定质量浓度 $c=0.01\text{ g/mL}$ 的丝氨酸为例,数值仿真了 BK7-介质结构中薄膜介电常数的实部和虚部改变对放大后的光自旋霍尔效应位移的影响,如伪彩色图 4(a) 所示,插入图为镀膜后的 BK7-介质结构示意图。可以发现放大后的光自旋霍尔效应位移随介电常数实部和虚部的变化存在三个极值点,并且放大后的光自旋霍尔效应位移以极值点为中心呈椭圆状辐射。这三个点也是系统分辨率的极值点,也可以说在厚度 $d=50\text{ nm}$ 时,这三个点的介电常数薄膜能提升系统分辨率。下面以辐射范围最广的极值点

($\epsilon=-1.5+5.7i$) 为例,得到了如图 4(b) 所示的不同厚度下放大后的光自旋霍尔效应位移随旋光角的变化。可以发现,在 $d=50\text{ nm}$ 时,放大后的光自旋霍尔效应位移随旋光角的变化曲线的斜率处于极大值,从而能得出系统的分辨率 S 达 $9.7\times 10^{-6}\text{ (}^\circ\text{)}/\mu\text{m}$ 的结论,这高于单纯 BK7 玻璃界面两个数量级。当厚度偏离 $d=50\text{ nm}$ 时,斜率从极大值点处逐渐减小,其原因可以推断为厚度的改变导致了极值点位置的变化。同时,探究介电常数的实部和虚部变化对放大后的光自旋霍尔效应位移的影响,图 4(c)、(d) 分别是固定介电常数的虚部和实部为 $5.7i$ 和 -1.5 ,不同实部以及虚部下放大后的光自旋霍尔效应位移随旋光角的变化。从图中可以得出:随介电常数的实部逼近 -1.5 以及虚部逼近 $5.7i$,放大后的光自旋霍尔效应位移与旋光角之间的斜率随之增大。图 4(c) 和 (d) 中介电常数实部和虚部对光自旋霍尔效应位移的影响与图 4(a) 中的辐射现象相吻合。这也可以进一步说明介质薄膜的参数在图 4(a) 中极值点处取值时,量子弱测量系统的分辨率也是极大值。

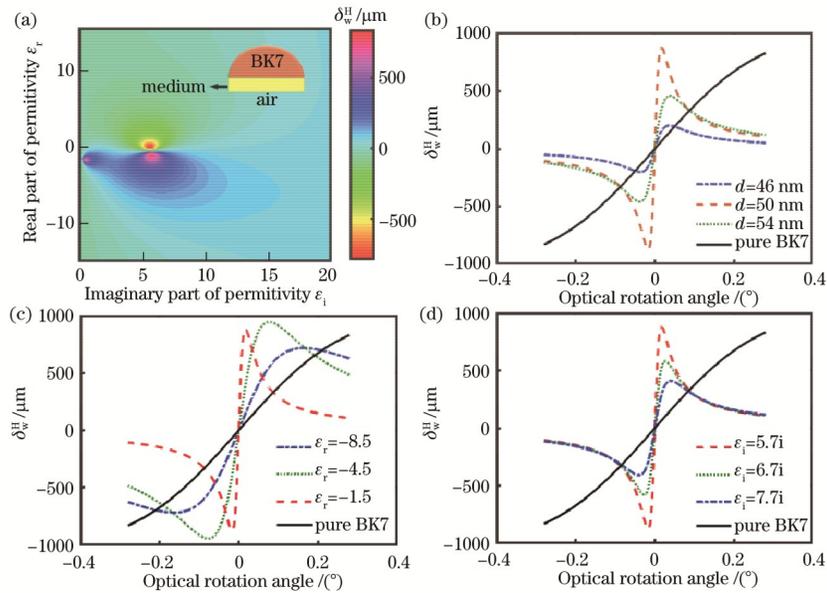


图 4 BK7-介质结构设计对量子弱测量系统分辨率的提升规律。(a)放大后光自旋霍尔效应位移随介电常数虚部以及实部变化的伪彩色图;(b)不同介质厚度、不同介电常数(c)实部和(d)虚部下,放大后光自旋霍尔效应位移随旋光角的变化

Fig. 4 Law of improving resolution of weak measurement system by designing BK7-medium structure. (a) Pseudo-color images of amplified spin Hall shift as a function of real and imaginary parts of permittivity; relationship of amplified spin Hall shift and optical rotation angle with (b) different thickness of medium and different (c) real part and (d) imaginary part of permittivity

综上所述,本文基于量子弱测量系统高分辨识别了氨基酸的种类,并分析了入射角和 BK7-介质结构设计对旋光角分辨率的影响规律。量子弱测量系统的分辨率可以通过减小入射角和合适地设计 BK7-介质结构得到提升,通过对 BK7-介质结构进行合理的设计,使其分辨率可比单纯 BK7 玻璃界面得到两个数量级的提升,可达 $9.7\times 10^{-6}\text{ (}^\circ\text{)}/\mu\text{m}$ 。同时需要指出的是,该量子弱测量系统主要针对单种氨基酸溶液种类的判别,将这套系统稍加调整也可实现两种氨基酸混

合溶液的质量浓度测定。通过文献[27]方法构建 BK7 玻璃和氨基酸溶液间的介质分界面,将反射光的光自旋霍尔效应位移作为探针可实现混合氨基酸溶液折射率 Δn 的传感,与此同时,以本文类似方法修正透射光的后选择态,实现溶液旋光角 a_s 的传感,从而得出该混合溶液的折射率和旋光角满足以下关系:

$$[a_1]lx + [a_2]ly = a_s, \quad (10)$$

$$n_1x + n_2y = \Delta n, \quad (11)$$

式中 x 和 y 分别是光路通过的长度为 l 的混合溶液中

两种氨基酸分子的质量浓度; $[a_1]$ 和 $[a_2]$ 分别是两种氨基酸分子的比旋光度; n_1 和 n_2 代表两种氨基酸分子折射率和质量浓度之间的线性关系因子^[42]。分析式(10)和(11)可知,在测定混合溶液中旋光角和折射率的情况下,可得到两种氨基酸分子的质量浓度 x 和 y 。

4 结 论

提出和实验论证了一种基于量子弱测量系统的氨基酸识别方案,并探究该系统中入射角和介质结构设计对分辨率的提升规律。首先,在固定入射角的情况下,理论和实验分析了放大后光自旋霍尔效应位移与旋光角的对应关系,通过实验论证基于量子弱测量系统的氨基酸种类高分辨识别方案。通过氨基酸样品质量浓度的选择确保放大后的光自旋霍尔效应位移与旋光角呈线性变化关系,进而基于 CCD 测得的放大后光自旋霍尔效应位移得知样品的旋光角,从而计算出比旋光度,并查表确定氨基酸的种类。接着探究不同入射角对量子弱测量系统中氨基酸种类识别分辨率的影响。可以发现,随着入射角的减小,固定氨基酸质量浓度下所对应放大后的光自旋霍尔效应位移越大,则量子弱测量系统的分辨率越大,这是由于放大后的光自旋霍尔效应位移随旋光角的变化曲线的斜率随入射角的减小而越来越陡峭。最后,仅给 BK7 玻璃镀一层介质薄膜来研究 BK7-介质结构的设计对氨基酸识别分辨率的提升规律。研究发现该分辨率与介质层的厚度、介电常数实部和虚部密切相关。以固定质量浓度 $c = 0.01 \text{ g/mL}$ 的丝氨酸样品和膜厚为 $d = 50 \text{ nm}$ 的 BK7-介质结构为例,分析发现放大后的光自旋霍尔效应位移随介质介电常数的实部和虚部变化时出现三个极值点,且该位移以极值点为中心呈椭圆状辐射,设计介电常数为 $\epsilon = -1.5 + 5.7i$ 时,分辨率可达 $9.7 \times 10^{-6} (\text{°})/\mu\text{m}$,这高于单纯 BK7 玻璃界面两个数量级。相比实验室常用的氨基酸识别方案,本文装置操作简单、不破坏样品,与此同时将这套系统稍加调整也可实现两种氨基酸混合溶液质量浓度的测定。这些研究将为设计高分辨率、便捷、非侵入的手性分子识别提供可能,并拓展了量子弱测量的应用范围。

参 考 文 献

- [1] Bender D A. Amino acid metabolism[M]. New York: John Wiley & Sons, 2012.
- [2] Ballantyne J S. Amino acid metabolism[J]. Fish Physiology, 2001, 20: 77-107.
- [3] Szabados L, Savouré A. Proline: a multifunctional amino acid[J]. Trends in Plant Science, 2010, 15(2): 89-97.
- [4] de Koning T J, Snell K, Duran M, et al. L-serine in disease and development[J]. Biochemical Journal, 2003, 371(3): 653-661.
- [5] Crumpler H R, Dent C E. Distinctive test for α -amino acids in paper chromatography[J]. Nature, 1949, 164(4167): 441-442.
- [6] Moore S. Amino acid analysis: aqueous dimethyl sulfoxide as solvent for the ninhydrin reaction[J]. Journal of Biological Chemistry, 1968, 243(23): 6281-6283.
- [7] Patrickios C S, Yamasaki E N. Polypeptide amino acid composition and isoelectric point II. Comparison between experiment and theory[J]. Analytical Biochemistry, 1995, 231(1): 82-91.
- [8] Tran D B A, Manfred K M, Peverall R, et al. Continuous-wave cavity-enhanced polarimetry for optical rotation measurement of chiral molecules[J]. Analytical Chemistry, 2021, 93(13): 5403-5411.
- [9] Li D M, Guan T, Liu F, et al. Optical rotation based chirality detection of enantiomers via weak measurement in frequency domain[J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(21): 213701.
- [10] Ghosh A, Fischer P. Chiral molecules split light: reflection and refraction in a chiral liquid[J]. Physical Review Letters, 2006, 97(17): 173002.
- [11] Aharonov Y, Albert D Z, Vaidman L. How the result of a measurement of a component of the spin of a spin-1/2 particle can turn out to be 100[J]. Physical Review Letters, 1988, 60(14): 1351-1354.
- [12] Xu L P, Luo L, Wu H, et al. Measurement of chiral molecular parameters based on a combination of surface plasmon resonance and weak value amplification[J]. ACS Sensors, 2020, 5(8): 2398-2407.
- [13] Ritchie N W, Story J G, Hulet R G. Realization of a measurement of a "weak value" [J]. Physical Review Letters, 1991, 66(9): 1107-1110.
- [14] Brunner N, Simon C. Measuring small longitudinal phase shifts: weak measurements or standard interferometry? [J]. Physical Review Letters, 2010, 105(1): 010405.
- [15] 胥亮, 张利剑. 基于弱值的量子精密测量与量子层析研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(10): 1011004.
Xu L, Zhang L J. Progress in weak-value-based quantum metrology and tomography[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(10): 1011004.
- [16] Hosten O, Kwiat P. Observation of the spin Hall effect of light via weak measurements[J]. Science, 2008, 319(5864): 787-790.
- [17] Ling X H, Xiao W L, Chen S Z, et al. Revisiting the anomalous spin-Hall effect of light near the Brewster angle[J]. Physical Review A, 2021, 103(3): 033515.
- [18] 王筠. 函数型光子晶体表面的光自旋霍尔效应[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(23): 2316003.
Wang Y. Spin Hall effect of light on the surface of functional photonic crystal[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(23): 2316003.
- [19] Ling X H, Zhou X X, Huang K, et al. Recent advances in the spin Hall effect of light[J]. Reports on Progress in Physics, 2017, 80(6): 066401.
- [20] Chen S Z, Ling X H, Shu W X, et al. Precision measurement of the optical conductivity of atomically thin crystals via the photonic spin Hall effect[J]. Physical Review Applied, 2020, 13(1): 014057.
- [21] Wu Y P, Liu S Q, Chen S Z, et al. Examining the

- optical model of graphene via the photonic spin Hall effect [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(4): 846-849.
- [22] 李星, 周新星, 罗海陆. 纳米金属薄膜中光子自旋霍尔效应的最佳弱测量[J]. *光学学报*, 2014, 34(7): 0731002. Li X, Zhou X X, Luo H L. Optimal weak measurements of photonic spin Hall effect in nanometal film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0731002.
- [23] Li J, Tang T T, Luo L, et al. Weak measurement of the magneto-optical spin Hall effect of light[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(9): 1014-1018.
- [24] Qiu X D, Zhou X X, Hu D J, et al. Determination of magneto-optical constant of Fe films with weak measurements[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(13): 131111.
- [25] Li T, Wang Q, Taallah A, et al. Measurement of the magnetic properties of thin films based on the spin Hall effect of light[J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 29086-29097.
- [26] Zhou X X, Sheng L J, Ling X H. Photonic spin Hall effect enabled refractive index sensor using weak measurements[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 1221.
- [27] Li N X, Tang T T, Li J, et al. Highly sensitive biosensor with graphene-MoS₂ heterostructure based on photonic spin Hall effect[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, 484: 445-450.
- [28] Xu Y, Shi L X, Guan T, et al. Multifunctional weak measurement system that can measure the refractive index and optical rotation of a solution[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(18): 181901.
- [29] Li D M, Guan T, He Y H, et al. A chiral sensor based on weak measurement for the determination of Proline enantiomers in diverse measuring circumstances[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2018, 110: 103-109.
- [30] Xie L G, Qiu X D, Luo L, et al. Quantitative detection of the respective concentrations of chiral compounds with weak measurements[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(19): 191106.
- [31] Liu J W, Zeng K M, Xu W H, et al. Ultrasensitive detection of ion concentration based on photonic spin Hall effect[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(25): 251102.
- [32] 陈敏, 罗朝明, 万婷, 等. 利用动力学相位和几何相位操控光自旋霍尔效应中的自旋分裂[J]. *光学学报*, 2017, 37(2): 0226002. Chen M, Luo Z M, Wan T, et al. Manipulation of spin splitting in spin Hall effect of light based on dynamic and geometric phases[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 0226002.
- [33] 万婷, 罗朝明, 闵力, 等. 基于合金介电常数的可控特性增强光子自旋霍尔效应[J]. *物理学报*, 2018, 67(6): 064201. Wan T, Luo Z M, Min L, et al. Enhanced photonic spin Hall effect due to controllable permittivity of alloy film[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(6): 064201.
- [34] Liu S Q, Shou Y C, Zhou X, et al. Lattice-dependent spin Hall effect of light in a Weyl semimetal[J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 10783-10793.
- [35] Liu S Q, Yang C F, Song Y F, et al. Role of Weyl cone tilting in the spin Hall effect of light[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, 54(28): 285108.
- [36] Tang P, Shu Y T, Wen Z X, et al. High-resolution determination of kinetic parameters of sucrose hydrolysis based on weak measurement[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(1): 6810106.
- [37] 周秀梅, 雷宝良, 张凤枰, 等. 旋光法测定木薯中淀粉含量不确定度评定[J]. *食品科学*, 2016, 37(12): 144-147. Zhou X M, Lei B L, Zhang F P, et al. Uncertainty evaluation for the determination of starch content in manihot esculenta by polarimetric method[J]. *Food Science*, 2016, 37(12): 144-147.
- [38] Lee M S, Khan F N, Shin S C, et al. Comparison of polarimetry and crown ether-based HPLC chiral stationary phase method to determine (L)-amino acid optical purity[J]. *Food Chemistry*, 2012, 135(2): 343-347.
- [39] 王杰, 刘焕香, 司宏宗, 等. 基于定量结构-性质关系方法预测氨基酸的比旋光度[J]. *分析化学*, 2006, 34(12): 1759-1762. Wang J, Liu H X, Si H Z, et al. Prediction of the power rotation of the amino acid based on the quantitative structure-property relationship method[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2006, 34(12): 1759-1762.
- [40] Grill A, Patel V. Low dielectric constant films prepared by plasma-enhanced chemical vapor deposition from tetramethylsilane[J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, 85(6): 3314-3318.
- [41] Yang G, Fu X J, Zhou J. Dielectric properties of the silver-copper alloy films deposited by magnetron sputtering[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, 30(2): 282-287.
- [42] Yunus W M, Rahman A B. Refractive index of solutions at high concentrations[J]. *Applied Optics*, 1988, 27(16): 3341-3343.