

基于弱值放大的高精度测量方法的研究现状

许杨^{1,2}, 周冲琪^{1,3*}, 何永红^{1,2**}

¹清华大学深圳国际研究生院, 光学成像与传感研究所, 深圳市微创医疗技术重点实验室, 广东 深圳 518055;

²清华大学深圳清华国际研究生院, 生物制药与卫生工程研究所, 广东 深圳 518055;

³清华大学物理系, 北京 100084

摘要 弱值放大技术由于“异常”的放大效应而被广泛地应用在微小物理效应的测量和高精度计量学中。研究表明, 弱值放大能够有效抑制技术噪声和提高系统的分辨率。本文介绍了弱值放大技术的原理和常见的系统构建, 简述了弱值放大在生物、材料和化学等领域的应用现状, 并对弱值放大技术的发展方向进行了展望。

关键词 测量; 弱值放大; 高精度测量; 光束的横向偏移; 频移

中图分类号 O436 **文献标志码** A

doi: 10.3788/CJL202148.1504003

1 引 言

弱值放大的概念是 Aharonov 等^[1]于 1988 年首次提出的。区别于传统强测量的观测量之值限制在本征值范围内, 弱值放大通过引入后选择过程, 在后选择态和前选择态接近正交时, 能够放大观测值, 使其远大于本征值。这一“异常”的放大效应一经提出便引起了广泛争议, 甚至有人质疑其在实际中的应用价值。1989 年, 多位研究人员对弱测量这一概念进行了重新阐述^[2-4]; 1991 年, Ritchie 等^[5]通过实验验证了“弱值”这一关键参数的存在。

2005 年和 2007 年, Pryde 小组^[6]和 Jozsa 小组^[7]分别通过弱值测量和测量复数的弱值严谨地解释了弱值实部与虚部的具体意义, 这两项工作真正将弱测量技术推向了高精密度测量的舞台。2008 年, Hosten 等^[8]在 *Science* 上发表的通过弱测量观察自旋霍尔效应的相关工作更是将聚光灯重新聚焦到弱测量这一具有广阔前景的技术上来。同一时期还有一些其他的利用弱测量对微小物理参数进行高精度测量的工作, 例如, 电子系统的弱测量实现^[9-10]、利用弱测量观测光的 IF/GH 效应^[11-16]、光束偏离角测量^[17-18]、磁光常数测量^[19]、温度测量^[20]、速度测

量^[21]、单光子到达时间检测^[22]和手性分子检测^[23-25]等。

自 2010 年以来, 相关理论表明弱测量技术在频域中表现出了更加明显的相位检测优势, 特别是中国科学技术大学李传锋教授课题组^[26]在 2011 年从理论上提出了可以利用白光在弱测量系统中实现光学相位的高灵敏检测, 并在 2013 年通过实验验证了这一理论^[27], 奠定了弱测量技术在光学频域检测中应用的基础。2016 年, 清华大学的何永红课题组^[28]使用宽带高亮度光源第一次实现了具有普适性应用价值的光学频域的弱测量系统。也就是说, 这一系统不局限于对单一物理参数的检测研究, 而是对同一类应用的分析与检测。与传统的光学检测系统相比, 这一光学系统在检测精度方面提高了 1~2 个数量级。

在弱值放大提出后的十几年中, 很多理论研究^[29-33]显示弱值放大技术虽然能放大观测值的变化和提高系统的灵敏度, 但其观测概率随着放大倍数的增大而急剧减小, 抵消了放大效果。分析显示, 弱值放大并不能提供更多的 Fisher 信息量, 其往往只能实现次优解。相较于传统测量, 弱值放大对一些技术噪声(光源抖动、探测器的偏移和饱和等)有着

收稿日期: 2021-03-16; 修回日期: 2021-04-11; 录用日期: 2021-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(62041501)、深圳市科学技术研究计划(JCYJ20170412171856582, JCYJ20170816161836562)、清华大学春风基金(2020Z99CFZ023)、清华大学深圳研究生院海外合作基金会项目(HW2018007)

通信作者: *zcq18@mails.tsinghua.edu.cn; **heyh@sz.tsinghua.edu.cn

非常显著的抑制效果。因此,当系统受限于此些技术噪声而不是散粒噪声等系统噪声时,弱值放大能够更好地达到系统的测量极限,实现更高的测量精度,这使得弱值放大技术能够被广泛应用于生物、材料和化学等领域的高精度计量中。

本文基于弱值放大在高精度测量中的实际应用,介绍了两类与弱值放大相结合的测量方法,它们分别通过分析光束的横向偏移和频移来测量物理量的变化。基于上述方法搭建的弱测量系统,弱值放大技术可以通过与传统测量方法相结合的途径来提高系统的分辨率。最后,本文讨论了弱值放大的发展趋势,并指出了其在生物和化学等领域进行高精度检测的前景。

2 理 论

在量子力学中,一个处于量子态 $|\psi_i\rangle$ 的系统,其可观测量 \hat{A} 在强测量中的平均值可以写成 $\langle \hat{A} \rangle = \langle \psi_i | \hat{A} | \psi_i \rangle / \langle \psi_i | \psi_i \rangle$, 其中 $\langle \hat{A} \rangle$ 的值必定位于最大和最小本征值之间。然而,Aharonov 及其合作者^[1]引入了一种新的量子测量理论的变形:对于某系统,经过前选择处于量子态 $|\psi_i\rangle$,再经后选择处于量子态 $|\psi_f\rangle$,如果量子态 $|\psi_i\rangle$ 和 $|\psi_f\rangle$ 彼此接近正交且均不为 \hat{A} 的本征态,那么弱值 A_w (定义 A_w 为该系统中

可观测量 \hat{A} 的弱值, $A_w = \langle \psi_f | \hat{A} | \psi_i \rangle / \langle \psi_f | \psi_i \rangle$) 通常会远大于 \hat{A} 的本征值。这一反常现象可以被应用在信号放大上。

考虑一个处于量子态 $|\psi_i\rangle$ 的系统的可观测量算符 \hat{A} ,采用冯·诺依曼测量来测量系统的指针态。假定系统的初始指针态为 $|\varphi\rangle$,为了测量物理量 A ,测量过程通常会引入相互作用哈密顿量

$$\hat{H} = \tau \delta(t - t_0) \hat{A} \hat{P}, \quad (1)$$

式中: τ 为耦合常数,且满足 $\int \tau \delta(t - t_0) dt = \tau$ 为实函数; \hat{P} 为指针态的可观测量算符; $\delta(t - t_0)$ 为狄拉克函数。

经过相互作用后,将系统后选择投射到量子态 $|\psi_f\rangle$ 。系统的指针态在后选择后(未归一化)可以写为

$$|\phi\rangle = \langle \psi_f | \exp(-j\tau \hat{A} \hat{P}) | \psi_i \rangle | \varphi \rangle, \quad (2)$$

式中: j 为虚数单位。当 τ 值极小且 $|\psi_i\rangle$ 和 $|\psi_f\rangle$ 彼此接近正交时,(2)式只保留到 $O(\tau)$,即

$$\begin{aligned} |\phi\rangle &\approx \langle \psi_f | 1 - j\tau \hat{A} \hat{P} | \psi_i \rangle | \varphi \rangle = \\ &\langle \psi_f | \psi_i \rangle (1 - \tau A_w \hat{P}) | \varphi \rangle \approx \\ &\langle \psi_f | \psi_i \rangle \exp(-j\tau \hat{A} \hat{P}) | \varphi \rangle. \end{aligned} \quad (3)$$

此时,可以对指针态的可观测量 X 进行测量,其平均值为

$$\begin{aligned} \langle X \rangle &= \frac{\langle \phi | \hat{X} | \phi \rangle}{\langle \phi | \phi \rangle} \approx \frac{\langle \varphi | \hat{X} | \varphi \rangle + j\tau \bar{A}_w \langle \varphi | \hat{P} \hat{X} | \varphi \rangle - j\tau A_w \langle \varphi | \hat{X} \hat{P} | \varphi \rangle}{\langle \varphi | \varphi \rangle + j\tau (\bar{A}_w - A_w) \langle \varphi | \hat{P} | \varphi \rangle} \approx \\ &\langle \hat{X} \rangle_i + j\tau \bar{A}_w \langle \hat{P} \hat{X} \rangle_i - j\tau A_w \langle \hat{X} \hat{P} \rangle_i - j\tau (\bar{A}_w - A_w) \langle \hat{X} \rangle_i \langle \hat{P} \rangle_i, \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\langle \hat{M} \rangle_i = \langle \varphi | \hat{M} | \varphi \rangle / \langle \varphi | \varphi \rangle$ 。

(4)式中没有限制指针态和系统态中可观测量算符的类型。这里主要介绍弱测量在高精度计量学中应用较广的两方面:光束的空间偏移和频移。对于光束偏移,由文献[7]可知,系统态的可观测量算符为动量算符 \hat{P} ,指针态可观测量通常为动量 p 和空间位置 q ,它们的平均值为

$$\langle q \rangle_f = \langle q \rangle_i + \tau \text{Re}(A_w) + \tau \text{Im}(A_w) \left(m \frac{d}{dt} V_q \right), \quad (5)$$

$$\langle p \rangle_f = \langle p \rangle_i + 2\tau \text{Im}(A_w) \times V_p, \quad (6)$$

式中: m 为指针的质量; $\text{Re}(\cdot)$ 和 $\text{Im}(\cdot)$ 分别表示实部和虚部。方差 V_q 和 V_p 的定义分别为

$$\begin{aligned} V_q &= \langle \varphi | q^2 | \varphi \rangle - \langle \varphi | q | \varphi \rangle^2, \\ V_p &= \langle \varphi | p^2 | \varphi \rangle - \langle \varphi | p | \varphi \rangle^2. \end{aligned} \quad (7)$$

从(5)式和(6)式可以看出,通过后选择,系统的

位置和动量平均值受弱值实部和虚部的影响。当弱测量条件满足且弱值的实部或者虚部远大于 1 时,能够实现相应物理观测量的放大。

2010年,Brunner等^[34]提出频域弱测量能够更好地抑制系统的噪声和偏差。在他们的方案中,指针态的可观测量为光频率 ω 或者波长 λ ,系统态可以取光束路径或者偏振态。利用他们的方案,也能观测到中心波长偏移的放大效果。

图 1 为频域弱测量系统的原理图^[35]。宽带光束先经过第一个偏振片进行前选择,再经偏振分束器(PBS)分成两个正交的偏振态沿不同的臂传播。两臂的光在另一个分束器上会合,之后穿过后一个偏振片进行后选择。在频域弱测量中,需要关注的主要是光束偏振态和不同臂间的相位差这两个物理量。

为了简化计算,不妨设第一个偏振片的透光方

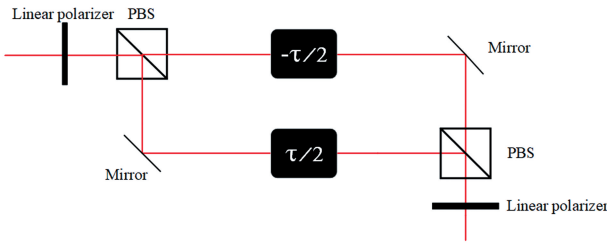


图 1 频域弱测量系统的原理图^[35]。偏振光由偏振分束器(PBS)分束到干涉仪的两臂,两臂的偏振态分别为 $|H\rangle$ 和 $|V\rangle$ 。不同臂间的传播时间不同,在后一个偏振分束器上两臂的光会合,之后穿过最后一个偏振片进行后选择

Fig. 1 Schematic of frequency domain weak measurement system^[35]. Polarized light is split by a polarization beam splitter (PBS) into two arms of the interferometer. Polarization states of the two arms are $|H\rangle$ and $|V\rangle$, respectively. Propagation time between different arms is different, and the light of the two arms on the latter polarizing beam splitter is combined, and it passes through the latter polarizer at the same time for post-selection

向与垂直方向的夹角为 $\pi/4$, 则有 $|\psi_i\rangle = (|H\rangle + |V\rangle)/\sqrt{2}$ 。假定经过 PBS 分束后两臂的偏振态分别为 $|\psi_r^+\rangle$ 和 $|\psi_r^-\rangle$ 且相互正交, 不失普遍性, 将它们写成

$$|\psi_r^+\rangle = \cos \frac{\beta}{2} |H\rangle + \sin \frac{\beta}{2} \exp(j\alpha) |V\rangle, \quad (8)$$

$$|\psi_r^-\rangle = \sin \frac{\beta}{2} \exp(j\alpha) |H\rangle - \cos \frac{\beta}{2} |V\rangle, \quad (9)$$

式中: (α, β) 为布洛赫球上的方位角; $|H\rangle$ 和 $|V\rangle$ 分别代表水平偏振态和垂直偏振态。由弱测量理论可知, 后选择态与前选择态接近正交, 可以选定后选择态 $|\psi_f\rangle = \sin\left(\frac{\pi}{4} + \delta\right) \exp(j\varphi/2) |H\rangle + \cos\left(\frac{\pi}{4} + \delta\right) \exp(-j\varphi/2) |V\rangle$, 其中, δ 为前后选择态间的夹角, φ 为 $|H\rangle$ 和 $|V\rangle$ 间的相位差, $\delta, \varphi \ll 1$ 。迈克耳孙干涉仪在这里起到的是耦合光束偏振态和光频率的作用, 可以用一个酉算子来描述, 即 $\hat{U} = \exp(-j\tau\hat{A}\omega)$, 其中 $\hat{A} = |\psi_r^+\rangle\langle\psi_r^+| - |\psi_r^-\rangle\langle\psi_r^-|$, ω 为光频率。由弱值的定义可知, 在一阶近似的情况下, 有

$$\text{Im}(A_w) = \frac{2\varphi \cos \beta - 4 \sin \beta \sin \alpha}{4\delta^2 + \varphi^2}. \quad (10)$$

由文献[35]可知, 在合适的 (α, β) 下能够实现

三个参量 τ, δ, φ 的弱值放大和测量。以实现相位差为 φ 的弱值放大为例, 此时取 $\alpha = \beta = \delta = 0$ 。为简便起见, 假定光源的光谱是中心频率为 ω_0 的高斯光谱, 光谱分布为 $I(\omega) = \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{\Delta^2}\right]$ (未归一化), Δ 为光谱的带宽。系统经过前选择、弱耦合和后选择后, 光谱分布为

$$I(\omega) = \sin^2(\tau\omega - \varphi) \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{\Delta^2}\right]. \quad (11)$$

在弱测量的反线性区域可以得到中心频率的偏移 $\Delta\omega$ 为

$$\Delta\omega = \frac{2\tau\Delta^2(\tau\omega_0 - \varphi)}{\tau^2\Delta^2 + 2(\tau\omega_0 - \varphi)^2}. \quad (12)$$

在频域弱测量中, 中心波长偏移随相位差变化的模拟曲线如图 2 所示。由图 2 可知, 随着耦合常数的减小, 中心波长偏移随相位变化的灵敏度提高, 展现出了弱测量对微小物理量的放大效果。弱值放大技术虽然能提高系统对微小物理量测量的灵敏度, 但却伴随着观测概率的减小。很多理论工作表明弱测量并不能增加系统的 Fisher 信息量。但是, 弱测量在实际应用中仍然具有很大潜力。对于商用探测器和光源, 由于存在很多技术噪声, 其性能指标往往不够好; 而弱测量在抑制这一类噪声上展现出很大的潜力。此外, 对于全反射和透射系统来说, 一般的探测器由于时间分辨率有限 (μs), 接收到的信号强度过强甚至过曝, 弱测量能够通过调节信号强度实现对系统的最优观测; 另一方面, 弱测量也能极大地提升探测器的分辨率, 实现对微弱信号的测量, 降低了对实验设备的精度要求。

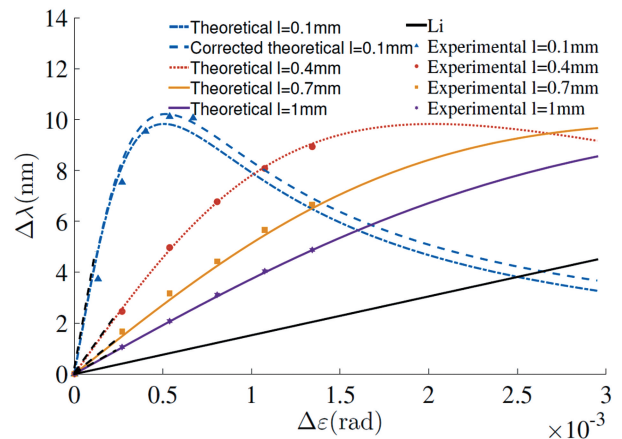


图 2 频域弱测量中中心波长偏移随相位差的变化^[35]
Fig. 2 Variation of center wavelength shift with phase difference in weak frequency domain measurement^[35]

3 光束偏移实验

弱测量和弱值放大技术的实用性在其提出时便受到了学术界的广泛质疑。在实现探测信号灵敏度极大提升的同时,弱值放大也显著降低了探测强度。理论工作表明,通过 Fisher 信息量计算弱值放大技术往往只能提供次优解^[30]。直到 2008 年^[8],一系列工作表明,弱值放大在测量微小的光束偏移时能够实现比传统测量方法更高的分辨率。这意味着弱测量在精密测量领域首次展示出了它的应用价值。本小节主要介绍近年来两类利用光束偏移实现高精度弱测量的装置。

图 3 为 2009 年提出的通过干涉仪实现弱值放大的实验装置^[17]。一束激光通过 50 : 50 的分束器后分成两束,沿着相反的传播路径进入干涉仪。对于理想的共路干涉仪,CCD 相机和探测器只能接收到极弱的信号或者完全消光。可以通过半波片(HWP)和相位补偿器(SBC)在两个相反的传播

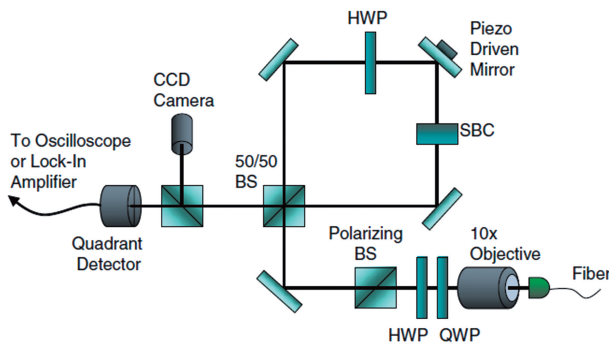


图 3 通过干涉仪实现弱值放大的实验装置示意图^[17]。波长为 780 nm 的光束经物镜准直;光束通过偏振片后进入由三个反射镜和一个以正方形排列的 50 : 50 分束器组成的 Sagnac 干涉仪;输出端口由象限检测器和 CCD 监视相机组成;干涉仪中的 SBC 和半波片允许对干涉仪的输出强度进行调整;压电反射镜实现光束的极小偏移

Fig. 3 Experimental setup diagram for realizing weak value enlargement by interferometer^[17]. Beam with a wavelength of 780 nm is collimated by the objective lens. Beam enters the Sagnac interferometer composed of three mirrors and a 50 : 50 beam splitter arranged in a square after passing through the polarizer. Output port consists of a quadrant detector and a CCD surveillance camera. SBC and half-wave plate in the interferometer allow adjustment of the output intensity of the interferometer. Piezoelectric mirror achieves minimal deviation of the beam

路径间引入相位差 ϕ ,从而实现接收端信号强度的变化,并在最佳的区域观测光束偏转。光束的偏振是通过压电反射镜实现的。如图 3 所示,系统的测量状态为光束的横向位置,用 $|x\rangle$ 来表示;系统的指针态为光束的传播路径,分别用 $|+\rangle$ 和 $|-\rangle$ 表示顺时针和逆时针的传播路径。可以看到,压电反射镜的偏转会打破干涉仪的对称性,沿不同路径传播的光束在接收端的偏移方向不同,从而实现传播路径与横向偏移间的耦合。可以用一个酉算子 \hat{U} 来表示这一效应,即 $\hat{U} = \exp(-jx\hat{A}k)$,其中 $\hat{A} = |+\rangle\langle+| - |-\rangle\langle-|$ 。在这里,文献[17]的作者将分束器、SBC 与光束的作用视为前选择过程,前选择态可以写作 $|\phi_i\rangle = [\exp(-i\phi/2)|+\rangle + \exp(i\phi/2)|-\rangle]/\sqrt{2}$;系统的后选择态可以写作 $|\phi_f\rangle = (i|+\rangle + |-\rangle)/\sqrt{2}$ 。由弱值放大理论可知,光束横向位置的变化与弱值相关 $\langle x \rangle = 2ka^2 |A_w| = 2ka^2/\phi$,其中 a 为光束直径。由该公式可知,光束横向位移的放大倍数和相位 ϕ 、光束直径 a 相关。相位 ϕ 越小,放大倍数就越高。该系统实现了 100 倍左右的放大倍数。同时,基于压电反射镜的周期性偏转和锁相放大器的应用,该实验装置能够实现 400×10^{-15} rad 极小偏转角度的测量,对应到压电驱动器的位移为 14×10^{-15} m,接近原子核的直径。

这一基于干涉仪的弱测量实验验证了弱值放大技术能够放大光束极小的横向偏转。同时,另一工作显示^[31],尽管弱值放大在放大信号的同时大大减小了信号的探测概率,但在考虑到一阶关联的技术噪声后发现,弱值放大能够显著降低技术噪声,提高系统的信噪比。

基于类似的实验装置,弱值放大技术被应用于一系列高灵敏测量实验中^[36-38]。Starling 等^[37]用具有色散效应的棱镜代替图 3 中的压电反射镜,实现了对激光频率的高精度测量;Hogan 等^[38]发现光束在两个反射镜间多次反射,可以实现角度的高精度测量。这里反射镜的偏移由周期性驱动的压电转换器控制,信号的探测通过一个劈裂的探测器实现。理论研究结果表明,这种探测方法能够实现与重心法相近的分辨率。

一个比较有趣的变形是 Liu 等^[36]在图 3 的基础上提出的采用近平衡弱值测量极小的角速度,实验装置如图 4 所示,这一系统参考了文献[39]中的参数估计方法。不同于传统弱测量中必须引入后选择过程,该方法在没有丢弃数据的同时,得到了与弱

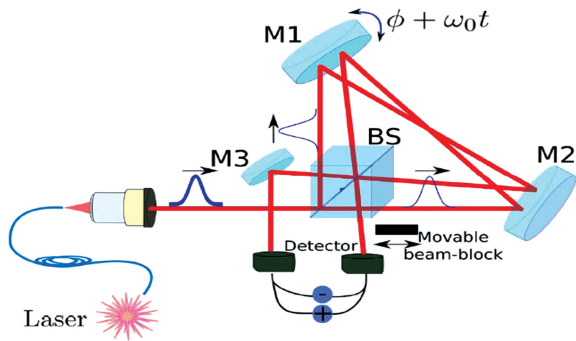


图 4 采用近平衡弱值测量极小角速度的实验装置图^[36]。干涉仪由一个分束器(BS)和两个反射镜(M1 和 M2)组成, M1 以 156×10^{-9} rad/s 的角速度转动将对向传播的光束在空间上分开, 从而引入由旋转镜倾斜而导致的相移。两个端口都测量两个路径光束合并后的干涉信号。该实验可以同时使用弱值放大(WVA)或几乎平衡弱值(ABWV)测量偏转角速度

Fig. 4 Experimental setup diagram for near-balanced weak measurement of extremely small angular velocity^[36]. Interferometer is composed of a beam splitter (BS) and two mirrors (M1 and M2). Beams propagating in opposite directions at the angular velocity of 156×10^{-9} rad/s of M1 are spatially separated, which introduces a phase shift caused by the tilt of the rotating mirror. Both ports measure the interference signal of the combined beams of the two paths. Experiment can use weak value amplification (WVA) or almost-balanced weak values (ABWV) to measure the deflection angular velocity simultaneously

测量相同的灵敏度, 其 Fisher 信息量为传统弱测量的 4 倍, 有着更高的分辨率。文献[36]显示, Liu 等采用非共路的干涉仪系统测量反射镜的角速度。传统的光束偏转实验是测量接收端光束位置的变化, 这里, 非共路的干涉仪可以将反射镜的偏转转换成不同传播路径光束间的相对相位差, 从而极大地提高了系统对反射镜偏转的测量灵敏度。在文献[36]中, Liu 等实现了对极小角速度 (33×10^{-9} rad/s) 的测量。

自旋霍尔效应能够实现左旋偏振光和右旋偏振光间极小的横向位移, 这一微弱效应可以很好地与弱测量结合起来^[8]。图 5 为自旋霍尔效应示意图。光束在棱镜的前表面发生自旋霍尔效应, 其相互作用的哈密顿量可以写为 $H = k_y \hat{A} \delta$, 其中 $\hat{A} = |+\rangle\langle+| - |-\rangle\langle-|$, $|+\rangle$ 和 $|-\rangle$ 分别代表左旋偏振光和右旋偏振光。前后选择分别由两个格兰偏振片实现, 其偏振态分别为 $|H\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|+\rangle + |-\rangle)$ 和 $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}[\exp(-jk_y \delta)|+\rangle + \exp(jk_y \delta)|-\rangle]$ 。该实验中光束的横向位移被放大了近 56 倍。Hosten 等^[8]分析了弱值放大技术对技术噪声的抑制效果, 验证了他们搭建的系统能够实现 0.1 nm 的分辨率。

反射光的自旋霍尔效应在实际中也有着广泛应用。文献[15, 40-41]分析了反射光中的 Goos-

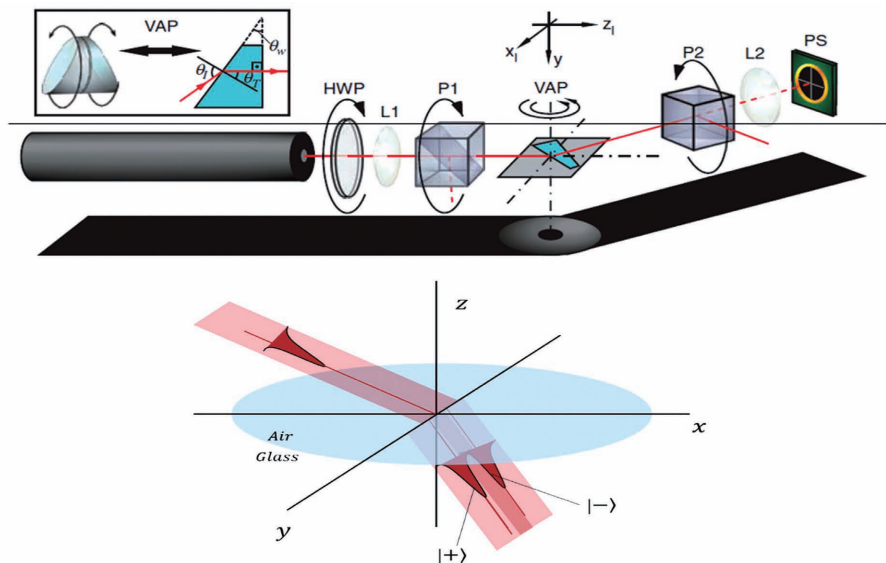


图 5 自旋霍尔效应^[8]。光束进入玻璃时发生折射, 其中 $|+\rangle$ 光和 $|-\rangle$ 光在 y 方向上有着相反的横向位移。位移大小与入射角、玻璃的折射率有关

Fig. 5 Spin Hall effect^[8]. Light is refracted when it enters the glass, where $|+\rangle$ and $|-\rangle$ spin components have opposite transverse displacements in y direction. Magnitude of the displacement is related to the angle of incidence and the refractive index of the glass

Hänchen 位移和 imbert-fedorov 位移,并通过弱值放大技术实现了对它们的观测。基于这些结果,自旋霍尔效应和弱值放大技术可以被广泛应用于材料表面的研究,如半导体和纳米金属薄膜^[42-45]。

此外,弱值放大技术还能够显著提升系统的灵敏度,这也被广泛应用于高精度传感器上。基于弱值放大的传感器按照原理主要可以分成三类:检测前、后选择态改变的传感器以及检测弱耦合作用变化的传感器^[24,46-47]。Qiu 等^[24]认为果糖和葡萄糖会改变光束的偏振态,通过测量探测器处光束重心的变化能够实现对光束旋转角和果糖浓度的测量,他们在实验中实现了 3×10^{-7} rad 的分辨率;Zhou 等^[46]通过表面等离子共振加强了折射率对自旋霍尔效应的影响,从而实现对折射率的检测,这种基于反射式的表面折射率检测在电化学、材料和生物领域均有着广泛的应用。

与基于干涉仪结构的弱测量技术相比,基于自旋霍尔效应的弱值放大技术在显著提升系统灵敏度的同时,极大地简化了弱值放大系统的结构,使其能够与各种光学传感方法(全反射、表面等离子共振等)相结合,在实际中有着广泛的应用。此外,最近有研究表明这一技术同样可以用于不同光束的测量,如涡旋光束^[48]。涡旋光束在折射时,其不同阶数的轨道角动量模式会移到不同的空间位置处,这一空间位置极小,通过弱值放大可以实现检测。弱值放大技术在不同波前光束的应用有助于进一步拓展它的适用范围。

4 基于频域的弱测量实验

目前,频域弱测量系统主要分为共光路系统^[49]和分光路系统^[28]两大类。从稳定性来讲,共光路系统中两个正交的偏振分量的路径相同,也就是说传播过程中经过的光学元件相同。由于需要解调的是两个偏振分量之间的相位差,因此共光路系统会使很多由光学元件差异或者振动等引起的系统误差得以减小,而分光路系统则不能避免这一类误差。因此,在稳定性方面,共光路系统是远优于分光路系统的。从功能上来说,分光路系统中两个偏振分量的传播路径是完全独立的,因此每一个偏振分量都可以独立控制,对于应用研究比较便利,而且可以适用的研究对象的范围也比较宽。但是共光路系统可以借助特定的物理机理来实现相位调制的功能,从而进行测量,例如全内反射、旋光性等。因此,两类频域弱测量系统均可在高精度检测领域发挥重要

作用。

弱测量系统将两个正交的偏振分量作为系统的两个本征态,根据弱测量中三个最重要的因素,前选择态 $|\psi_i\rangle$ 和后选择态 $|\psi_f\rangle$ 都可以用这两个正交偏振分量表示出来。在频域弱测量中,系统与设备之间的相互作用使得两个正交的本征态之间会产生一个相位上的相互分离,利用出射光谱的中心波长移动就可以定量表征这个相位大小。同时,对出射光谱的形状进行理论模拟可以发现出射光谱的形状会随着两个分量之间相位差的改变而改变,随着相位差在一定范围内增加,它可以呈现为从单个高斯峰变为双峰形式再回到高斯峰这样的周期性振荡。在该过程中,出射光谱的中心波长也会出现这种周期性的振荡,而且在反线性区域变化得十分迅速。也就是说,反线性区尤其适合作为高精度检测的工作区间。

5 共光路弱测量系统

5.1 全内反射弱测量系统

图6为常见的基于全内反射的弱测量系统^[49-50]。经过前选择后,两个相互垂直的偏振分量在棱镜表面发生全内反射,再由波片组或 Soleil-Babinet 补偿器(SBC)进行相位调制后进行后选择,从而实现弱测量过程。根据菲涅耳公式,在实际检

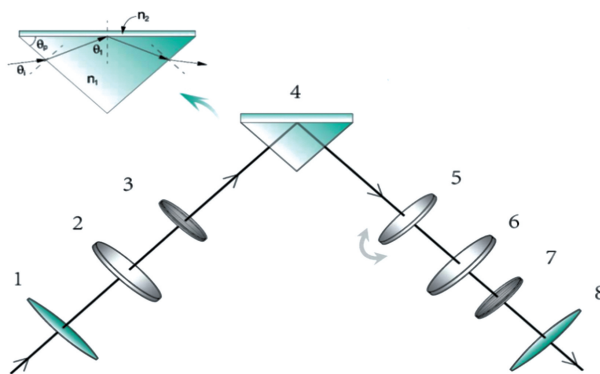


图6 弱测量相位解调系统原理图^[49]。左上角插图为全内反射示意图。1,准直透镜;2,高斯滤光片;3,偏振片,前选择态;4,棱镜;5和6,四分之一波片;7,偏振片,后选择态;8,耦合透镜

Fig. 6 Schematic of weak measurement phase demodulation system^[49]. Illustration in the upper left corner: schematic of total reflection. In figure: 1, collimating lens; 2, Gaussian filter; 3, polarizer, front selection state; 4, prism; 5 and 6, quarter wave plates; 7, polarizer, post-selection state; 8, coupling lens

测过程中,全内反射界面后表面的折射率变化会使两个偏振分量之间的相位差改变,这个相位差变化可以被系统放大,从而对引起界面折射率变化的物理量实现检测。如图 7 所示,基于全内反射的弱测量系统的折射率分辨率已达到 10^{-7} RIU,相较于传统的全内反射系统大大提高。基于弱测量的全内反

射传感系统与表面等离子共振系统类似,都具有实时、非侵入、无标记、高灵敏度、高分辨率、高鲁棒性等特点,目前主要被应用于分子动力学和电化学氧化还原过程的研究。相较于表面等离子共振系统,弱测量系统在无需镀膜的情况下仍能保证高检测精度,使得检测成本和操作难度等大大降低。

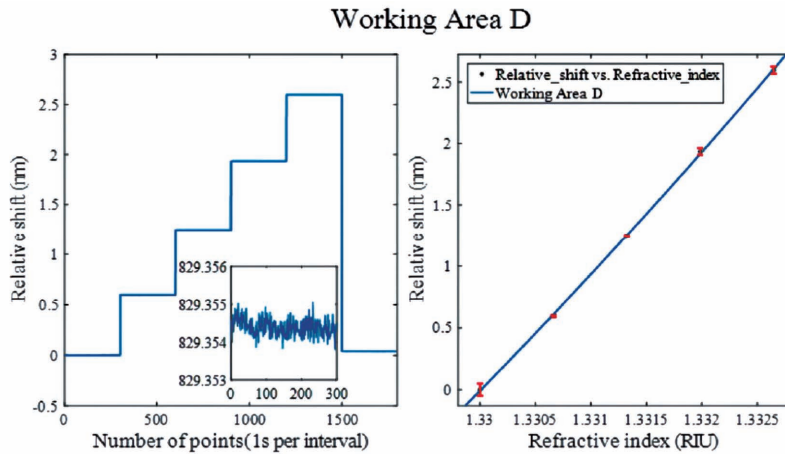


图 7 基于弱测量的全内反射传感系统中不同浓度梯度氯化钠溶液的检测实验(左图)及折射率拟合线(右图)^[51]
 Fig. 7 Detection experiment of different concentration gradients sodium chloride solution via total internal reflection sensor system based on weak measurement (left) and refractive index fitting line (right)^[51]

5.2 直线旋光弱测量系统

对于偏振光来说,线偏振光与圆偏振光通常可以利用相似的表达式来表示。例如,线偏振光可以看成左旋和右旋圆偏振光的合成,而圆偏振光也可以看成是水平与垂直偏振光合成的。因此,左旋和右旋圆偏振光用线偏振表示就可以分别写成 $|L\rangle = (\sqrt{2}/2) [|H\rangle - j|V\rangle]$ 和 $|R\rangle = (\sqrt{2}/2) \cdot [|H\rangle + j|V\rangle]$ 的形式,其中 L 代表左旋圆偏振, R 代表右旋圆偏振。在弱测量中,测量系统与设备之间的弱相互作用使得系统的两个本征态之间产生了一个微小的相移,这个弱耦合的参数可以通过放大后的系统态读出。而这个放大的机理就是弱值放大,弱值定义为 $A_w = \langle \psi_f | \hat{A} | \psi_i \rangle / \langle \psi_f | \psi_i \rangle$ 。可以看出,弱值的大小由前后选择态决定。而对于光学系统

来说,前后选择态由偏振片实现。因此,如果对前后选择偏振态进行调制,也可以从出射的系统态中读出弱值,这为旋光性测量提供了可能^[52-53]。

图 8 所示为直线旋光弱测量系统示意图。因为弱值放大现象的存在,系统对旋光角的变化极其灵敏,图中所示系统可以通过在前选择偏振片与四分之一波片间放置样品池等方式实现手性物质和旋光结构的检测。目前,旋光弱测量系统对旋光检测的分辨率约为 0.00001° ,大大优于现有的偏光仪等装置的分辨率。目前,旋光弱测量系统同样具有快速、无标记、高灵敏度、高分辨率、高鲁棒性等特点,如图 9 所示,该系统目前主要被应用于旋光性物质的非特异性检测,但无法检测分子动力学过程。

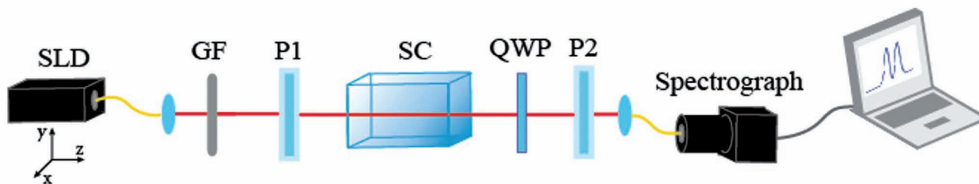


图 8 传感器系统示意图^[54]。SLD:光源;GF:高斯滤光片;P1 和 P2:偏振片;SC:样品池;QWP:四分之一波片
 Fig. 8 Sensor system schematic^[54]. SLD: light source; GF: Gaussian filter; P1 and P2: polarizers; SC: sample cell; QWP: quarter wave plate

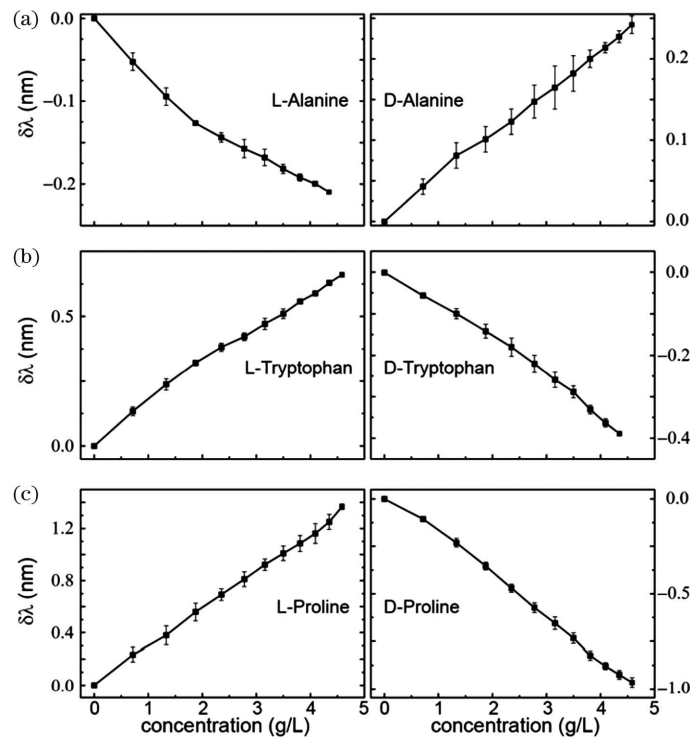


图 9 利用弱测量方法测量 L-Alanine 和 D-Alanine、L-Tryptophan 和 D-Tryptophan、L-Proline 和 L-Proline 的浓度响应曲线^[52]

Fig. 9 Use weak measurement method to measure the concentration response curve of L-Alanine and D-Alanine, L-Tryptophan and D-Tryptophan, and L-Proline and D-Proline^[52]

5.3 分光路弱测量系统

在频域弱测量中,通常将利用偏振分光棱镜把两个相互垂直的偏振分量分为单独传播路径的系统称为分光路系统。调节光路时需要保证前后选择态接近正交,再引入弱扰动就可以在系统中实现弱测量。在马赫-曾德尔干涉仪、迈克耳孙干涉仪等分光路干涉系统中,两个光路的传播路径是完全独立的,因此每一个光路都可以独立控制,更易于调节。在分光路弱测量系统中,超发光二极管发出的光经过一个高斯滤光片滤光以后进行前选择。这里主要通过接近正交的前后选择偏振片进行前后选择。入射光经过前选择偏振片后由一个偏振分光棱镜将垂直偏振光和水平偏振光完全分开,两束相互垂直的偏振光在各自的路径上独立传播一段时间(通过调节使得独立传播路径相等)后再通过偏振分光棱镜耦合成一束光,之后通过后选择偏振片进行后选择后被光谱仪接收。图 10 为马赫-曾德尔弱测量系统和迈克耳孙弱测量系统,如图所示,两套系统中各自相互独立的偏振分量都具有一段独立的传播路径,如果两束偏振光中的一束光的光程发生改变,就会在整个系统中引入一个相位差,从而实现系统的弱耦合状态。根据频域弱测量理论,可以通过对系统出射光谱的中心波长偏移量的监测计算出相位差的大小^[28,54]。

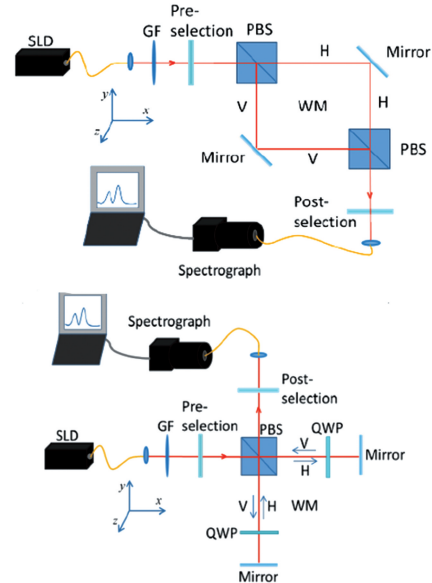


图 10 基于马赫-曾德尔干涉仪的弱测量系统(上图)^[28]和基于迈克耳孙干涉仪的弱测量系统(下图)^[55]。SLD:光源;GF:高斯滤光片;PBS:偏振分光棱镜;H:水平偏振光;V:垂直偏振光;WM:弱测量;QWP:四分之一波片

Fig. 10 Weak measurement system based on Mach-Zehnder interferometer (upper)^[28] and Michelson interferometer (below)^[55]. SLD: light source; GF: Gaussian filter; PBS: polarization beam splitter; H: horizontally polarized light; V: vertically polarized light; WM: weak measurement; QWP: quarter wave plate

分光路系统可以用来估计一些与位移、传播速度、振动频率、折射率、厚度变化等相似的参数。分光路弱测量系统具有实时、无标记、超高灵敏度、超高分辨率等特点；由于是分光路系统，其相较于共光

路系统缺乏稳定性，但具有偏振分量独立传播、光路引入光程或相位手段较多等优势。目前，该传感系统的应用场景比较广泛，包括分子含量、分子动力学（图 11）、横/纵向声波等研究。

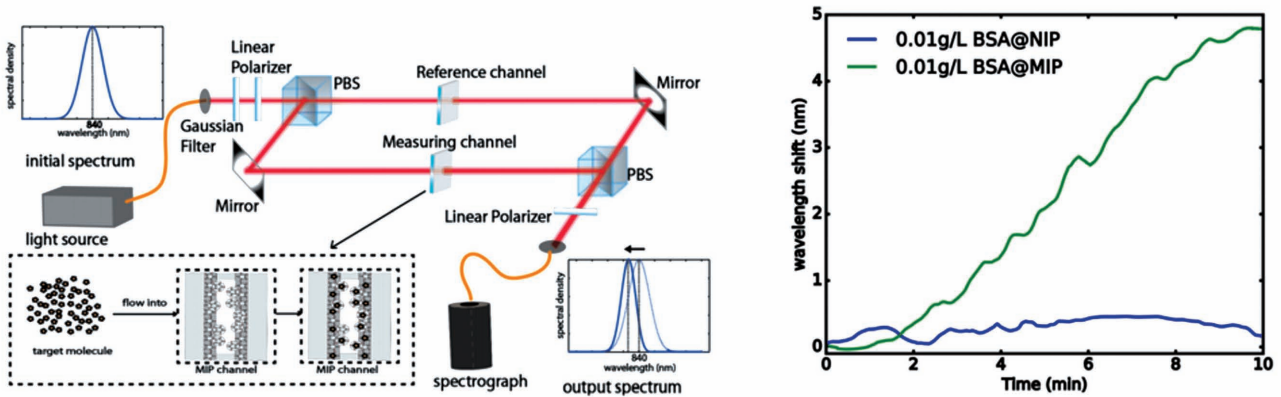


图 11 基于弱测量的分子印迹传感器(MIP)传感器的结构设计(左图)和血清蛋白的特异性筛选过程(右图)^[56]

Fig. 11 Structural design of MIP sensor based on weak measurement (left) and specific screening process of serum proteins (right)^[56]

频域弱测量技术及系统具有高灵敏度、高分辨率、高稳定性、易于集成、成本低等突出优势，已在生物分子检测领域展现出了巨大的优势。目前，光学检测方法以其响应快、无损、非接触等优势在生物医学等检测领域具有十分重要的地位，加之弱测量独有的弱值放大技术可以更加适用于高精度检测，所以，目前很多研究都围绕着将弱测量方法引入生物医学检测领域展开。可以根据不同的应用场景进行设计并选择不同种类的弱测量系统，目前根据应用场景和检测需求的不同，频域弱测量研究主要可以分为特异性与非特异性两类。其中特异性检测主要有免疫球蛋白检测^[49]、癌症标记物检测(如图 12 所示)^[50]、利用分子印迹进行检测^[9,56-57]等，非特异性

检测有氨基酸检测^[52-53,58]、血糖检测^[28]、乳酸检测^[59]、DNA 解链复链过程研究(如图 13 所示)^[60]、抗坏血酸检测^[61]、多糖水解检测等。同时，除了可以在生物分子领域应用之外，频域弱测量系统在磁场检测^[62]、横/纵向声场检测^[54-55]、温度检测^[62]等领域也展现出了高灵敏度、高分辨率的优势。

近几年，频域弱测量系统不仅在生物分子检测等方面不断拓展其应用领域，还对其自身进行了优化与创新，具体有：1)围绕哈密顿函数讨论频域弱测量系统在检测过程中工作区域的局限性，从理论上将弱测量技术进行了创新，将原有弱测量系统工作区域的数量从一个拓展到了多个^[63]；2)针对检测系统中数据的采集方式和处理方法等关键步骤，同时

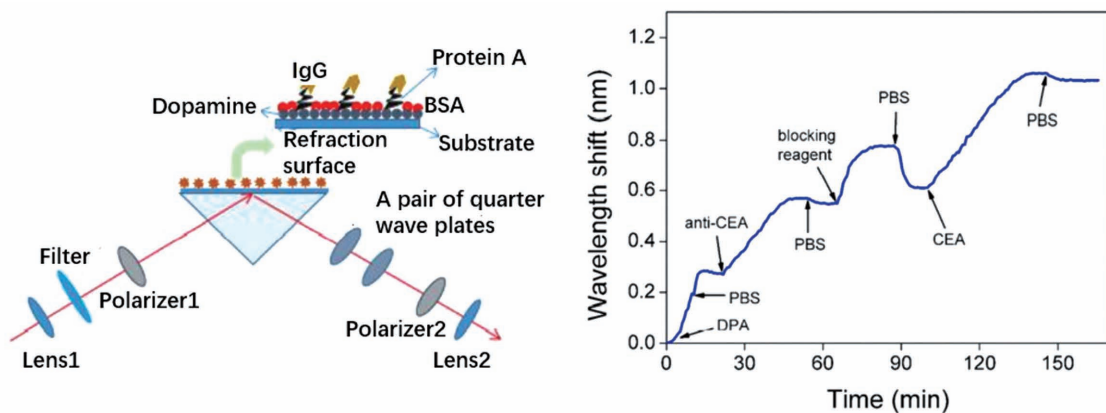


图 12 基于弱测量的全内反射传感系统对癌症标记物分子检测示意图(左图)和检测过程中系统光谱中心波长的实时偏移情况(右图)^[50]

Fig. 12 Schematic of detection of cancer marker molecules by a total internal reflection sensor system based on weak measurement (left) and real-time shift of system's spectral center wavelength during the detection process (right)^[50]

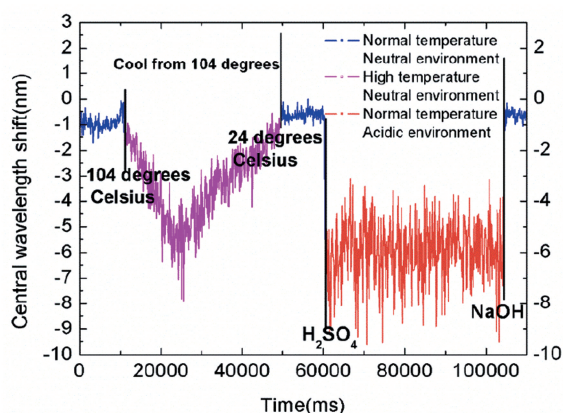


图 13 直线旋光弱测量系统对 DNA 解链复链过程的实时检测^[60]

Fig. 13 Real-time detection of the process of DNA melting and re-stranding by linear rotation optical weak measurement system^[60]

结合弱测量检测的特点,分别通过数字高斯滤波技术和双峰比值表征方法提升了弱测量系统的检测区域范围、分辨率、检测灵敏度和系统的稳定性等性能^[51];3)利用旋光色散效应极大地提高了频域弱测量系统的检测灵敏度^[35];4)根据不同的检测场景,对上文基础的频域弱测量系统(主要包括旋光差分弱测量系统^[64-65]、反射式差分弱测量系统^[66-67]、多功能弱测量系统^[68]、多次反射弱测量系统^[69]和多通道弱测量系统)进行升级,且已完成了更多功能的升级。

6 结束语

弱值放大技术区别于传统测量的关键在于它引入了后选择过程,放大了系统观测量的变化值,这使得弱值放大技术很容易与传统的检测方法相结合并优化系统的性能。本文主要介绍了弱值放大在干涉仪系统、自旋霍尔效应检测系统、全反射系统和透射系统上的应用,很多研究表明该技术在光的巨大自旋霍尔效应、表面等离子体共振、核磁共振等弱值放大方面都有着巨大的潜力。因此,弱值放大技术的一个重要前景就是发展弱值放大技术在物理领域的新应用,认识和了解弱值放大的机制。此外,理论上完善和改进弱值放大技术也是极其重要的工作之一。与标准的弱测量和重心估计法相比,现在发展出的新的弱值放大技术和参数估计方法^[70],如偏置弱值放大法、双弱值放大法和最大似然法,能够实现更高的放大倍数和分辨率,在高精度测量方面有着重要的应用价值。最近,有研究工作^[71-72]显示,在⁴⁰Ca⁺的离子阱中,将离子的电子态和振动模式耦

合,通过合适的前后选择过程,也能够观测到离子波函数间的相消干涉现象,实现中心位置的放大。这一研究工作验证了弱测量在量子领域的可行性,为相关的量子实验提供了新的手段。

另外,光学检测方法在材料、化学和生物领域具有广泛应用^[73-75]。结合传统的检测方法和弱值放大技术,实现更高的系统分辨率和指标是弱测量在高精度测量上的直接应用。由于弱值放大技术能够极好地抑制技术噪声,现有的弱测量系统的分辨率相比传统系统能实现 1~2 个数量级的提升。但是,由于光束偏移和频域测量都要求高一维度的信息(空间分布、频域),因此弱值放大技术很难应用于高流量的测量中,这也是目前弱值放大技术在应用中的一个瓶颈。在材料、生物等领域实现二维甚至三维空间的弱测量具有极高的应用价值。在应用上,现有的弱值放大技术有着一定的局限性,如测量范围较窄,很难实现系统内部的测量。如何根据应用需求改进弱值放大也是未来的一个研究重点。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Leggett A J. Comment on "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*, 1989, 62(19): 2325.
- [3] Peres A. Quantum measurements with postselection [J]. *Physical Review Letters*, 1989, 62(19): 2326.
- [4] Duck I M, Stevenson P M, Sudarshan E C. The sense in which a "weak measurement" of a spin-1/2 particle's spin component yields a value 100 [J]. *Physical Review D*, 1989, 40(6): 2112-2117.
- [5] 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.
- [6] Pryde G J, O'Brien J L, White A G, et al. Measurement of quantum weak values of photon polarization [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(22): 220405.
- [7] Jozsa R. Complex weak values in quantum measurement [J]. *Physical Review A*, 2007, 76(4): 044103.
- [8] Hosten O, Kwiat P. Observation of the spin Hall effect of light via weak measurements [J]. *Science*, 2008, 319(5864): 787-790.
- [9] Fleming S, Milne W I, Hasko D G. Continuous weak

- measurement of a trapped electron using a percolation field effect transistor [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(9): 093110.
- [10] Zilberberg O, Romito A, Gefen Y. Charge sensing amplification via weak values measurement [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(8): 080405.
- [11] Chen S Z, Mi C Q, Cai L, et al. Observation of the Goos-Hänchen shift in graphene via weak measurements [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(3): 031105.
- [12] Parks A D, Spence S E. Weak value amplification of an off-resonance Goos-Hänchen shift in a Kretschmann-Raether surface plasmon resonance device [J]. *Applied Optics*, 2015, 54 (18): 5872-5876.
- [13] Jayaswal G, Mistura G, Merano M. Weak measurement of the Goos-Hänchen shift [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(8): 1232-1234.
- [14] Jayaswal G, Mistura G, Merano M. Observation of the Imbert-Fedorov effect via weak value amplification [J]. *Optics Letters*, 2014, 39 (8): 2266-2269.
- [15] Goswami S, Pal M, Nandi A, et al. Simultaneous weak value amplification of angular Goos-Hänchen and Imbert-Fedorov shifts in partial reflection [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(21): 6229-6232.
- [16] Prajapati C, Viswanathan N K. Simultaneous weak measurement of angular and spatial Goos-Hänchen and Imbert-Fedorov shifts [J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(10): 105611.
- [17] Dixon P B, Starling D J, Jordan A N, et al. Ultrasensitive beam deflection measurement via interferometric weak value amplification [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(17): 173601.
- [18] Park S J, Kim H J, Noh J. Weak value measurement of an optical beam deflection in image rotating Sagnac interferometer [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2012, 16(3): 277-281.
- [19] 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.
- [20] Salazar-Serrano L J, Barrera D, Amaya W, et al. Enhancement of the sensitivity of a temperature sensor based on fiber Bragg gratings via weak value amplification [J]. *Optics Letters*, 2015, 40 (17): 3962-3965.
- [21] Viza G I, Martínez-Rincón J, Howland G A, et al. Weak-values technique for velocity measurements [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(16): 2949-2952.
- [22] Wang Q, Sun F W, Zhang Y S, et al. Experimental demonstration of a method to realize weak measurement of the arrival time of a single photon [J]. *Physical Review A*, 2006, 73(2): 023814.
- [23] Pfeifer M, Fischer P. Weak value amplified optical activity measurements [J]. *Optics Express*, 2011, 19 (17): 16508-16517.
- [24] Qiu X D, Xie L G, Liu X, et al. Estimation of optical rotation of chiral molecules with weak measurements [J]. *Optics Letters*, 2016, 41 (17): 4032-4035.
- [25] 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: 191106.
- [26] Li C F, Xu X Y, Tang J S, et al. Ultrasensitive phase estimation with white light [J]. *Physical Review A*, 2011, 83(4): 044102.
- [27] Xu X Y, Kedem Y, Sun K, et al. Phase estimation with weak measurement using a white light source [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111 (3): 033604.
- [28] Li D, Shen Z, He Y, et al. Application of quantum weak measurement for glucose concentration detection [J]. *Applied Optics*, 2016, 55 (7): 1697-1702.
- [29] Kedem Y. Using technical noise to increase the signal-to-noise ratio of measurements via imaginary weak values [J]. *Physical Review A*, 2012, 85(6): 060102.
- [30] Jordan A N, Martínez-Rincón J, Howell J C. Technical advantages for weak-value amplification: when less is more [J]. *Physical Review X*, 2014, 4: 011031.
- [31] Starling D J, Dixon P B, Jordan A N, et al. Optimizing the signal-to-noise ratio of a beam-deflection measurement with interferometric weak values [J]. *Physical Review A*, 2009, 80 (4): 041803.
- [32] Feizpour A, Xing X X, Steinberg A M. Amplifying single-photon nonlinearity using weak measurements [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107 (13): 133603.
- [33] Kedem Y. Using technical noise to increase the signal-to-noise ratio of measurements via imaginary weak values [J]. *Physical Review A*, 2012, 85(6): 060102.
- [34] Brunner N, Simon C. Measuring small longitudinal phase shifts: weak measurements or standard interferometry? [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105: 010405.
- [35] Zhou C Q, Zhong S Y, Ma K J, et al. Measuring

- angular rotation via the rotatory dispersion effect[J]. *Physical Review A*, 2020, 102(6): 063717.
- [36] Liu W T, Martínez-Rincón J, Viza G I, et al. Anomalous amplification of a homodyne signal via almost-balanced weak values [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(5): 903-906.
- [37] Starling D J, Dixon P B, Jordan A N, et al. Precision frequency measurements with interferometric weak values[J]. *Physical Review A*, 2010, 82(6): 063822.
- [38] Hogan J M, Hammer J, Chiow S W, et al. Precision angle sensor using an optical lever inside a Sagnac interferometer [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(9): 1698-1700.
- [39] Martínez-Rincón J, Liu W T, Viza G I, et al. Can anomalous amplification be attained without postselection? [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(10): 100803.
- [40] Qin Y, Li Y, He H, et al. Measurement of spin Hall effect of reflected light[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(17): 2551-2553.
- [41] Luo H L, Zhou X X, Shu W X, et al. Enhanced and switchable spin Hall effect of light near the Brewster angle on reflection[J]. *Physical Review A*, 2011, 84(4): 043806.
- [42] Ménard J M, Mattacchione A E, van Driel H M, et al. Ultrafast optical imaging of the spin Hall effect of light in semiconductors [J]. *Physical Review B*, 2010, 82(4): 045303.
- [43] Gorodetski Y, Niv A, Kleiner V, et al. Observation of the spin-based plasmonic effect in nanoscale structures[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(4): 043903.
- [44] Shitrit N, Bretner I, Gorodetski Y, et al. Optical spin Hall effects in plasmonic chains [J]. *Nano Letters*, 2011, 11(5): 2038-2042.
- [45] Zhou X X, Xiao Z C, Luo H L, et al. Experimental observation of the spin Hall effect of light on a nanometal film via weak measurements[J]. *Physical Review A*, 2012, 85(4): 043809.
- [46] 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.
- [47] Zhou X X, Zhang J, Ling X H, et al. Photonic spin Hall effect in topological insulators [J]. *Physical Review A*, 2013, 88(5): 053840.
- [48] Long W J, Pan J T, Guo X Y, et al. Optimized weak measurement of orbital angular momentum-induced beam shifts in optical reflection [J]. *Photonics Research*, 2019, 7(11): 1273-1278.
- [49] Zhang Y, Li D, He Y, et al. Optical weak measurement system with common path implementation for label-free biomolecule sensing[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(22): 5409-5412.
- [50] Guan T, Wang X N, Li D M, et al. Determination of tumor marker carcinoembryonic antigen with biosensor based on optical quantum weak measurements [J]. *Sensors*, 2018, 18(5): 1550-1562.
- [51] Xu Y, Shi L, Guan T, et al. Optimization of a quantum weak measurement system with digital filtering technology [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(27): 7956-7966.
- [52] 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.
- [53] 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.
- [54] Li D M, Guan T, Jiang J Y, et al. Nondisturbing transverse acoustic sensor based on weak measurement in Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(3): 034107.
- [55] He Y H, Li D M. Method for detecting underwater sound field information, device and underwater acoustic sensor: CN105928605A [P]. 2016-09-07. 何永红, 李东梅. 一种检测水中声场信息的方法、装置及水下声传感器: CN105928605A [P]. 2016-09-07.
- [56] Li D M, He Q H, He Y H, et al. Molecular imprinting sensor based on quantum weak measurement [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2017, 94: 328-334.
- [57] Xin M G, Zeng L, Ran D, et al. Label-free rapid identification of cooked meat using MIP-quantum weak measurement [J]. *Food and Agricultural Immunology*, 2020, 31(1): 317-328.
- [58] Zhang Y J, Shi L X, Xu Y, et al. Optical quantum weak measurement coupled with UV spectrophotometry for sensitively and non-separatedly detecting enantiopurity[J]. *Optics Express*, 2019, 27(7): 9330-9342.
- [59] Qiao Z, Shi L X, Guan T, et al. The real-time determination of D- and L-lactate based on optical weak measurement [J]. *Analytical Methods*, 2019, 11(16): 2223-2230.
- [60] Guan T, Yang Y X, Zhang Q W, et al. Label-free and non-destruction determination of single-and double-strand DNA based on quantum weak measurement [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 1891.

- [61] Zhong S Y, Guan T, Xu Y, et al. Weak measurement-based sensor for the rapid identification of L(+)-ascorbic acid and D(-)-isoascorbic acid[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(31): 8583-8588.
- [62] Zhong S Y, Guan T, Xu Y, et al. Simultaneous sensing axial and radial magnetic fields based on weak measurement [J]. *Optics Communications*, 2021, 486: 126777.
- [63] Xu Y, Shi L X, Guan T, et al. Optimization of a quantum weak measurement system with its working areas[J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 21119-21131.
- [64] Xu Y, Shi L X, Li S X, et al. Detection of macromolecular content in a mixed solution of protein macromolecules and small molecules using a weak measurement linear differential system[J]. *Analytical Chemistry*, 2019, 91(18): 11576-11581.
- [65] Xu Y, Shi L X, Guan T, et al. Rapid separation of enantiomeric impurities in chiral molecules by a self-referential weak measurement system [J]. *Sensors*, 2018, 18(11): 3788.
- [66] Li D M, Guan T, He Y H, et al. A differential weak measurement system based on Sagnac interferometer for self-referencing biomolecule detection[J]. *Journal of Physics D*, 2017, 50(49): 49LT01.
- [67] Xiong N, Guan T, Xu Y, et al. A differential detection method based on a linear weak measurement system[J]. *Sensors*, 2019, 19(11): 2473.
- [68] 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.
- [69] Shi L X, Guan T, Xu Y, et al. Enhanced interferometric weak value amplification with multiple reflection[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(19): 1557-1560.
- [70] Huang J Z, Li Y J, Fang C, et al. Toward ultrahigh sensitivity in weak-value amplification [J]. *Physical Review A*, 2019, 100: 012109.
- [71] Wu C W, Zhang J, Xie Y, et al. Scheme and experimental demonstration of fully atomic weak-value amplification [J]. *Physical Review A*, 2019, 100(6): 062111.
- [72] Pan Y M, Zhang J, Cohen E, et al. Weak-to-strong transition of quantum measurement in a trapped-ion system[J]. *Nature Physics*, 2020, 16(12): 1206-1210.
- [73] Sun K, Zhou H, Yang Y K, et al. Research advances in blood glucose monitoring system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(2): 0207003. 孙凯, 周华, 杨膺琨, 等. 血糖监测系统的研究进展 [J]. *中国激光*, 2018, 45(2): 0207003.
- [74] Liu H, Bai B B, Zhang Y Z, et al. High-sensitivity temperature measurement based on SPR in gold-PDMS-coated photonic crystal fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0404003. 刘海, 白冰冰, 张砚曾, 等. 基于 SPR 效应的金-PDMS 涂覆光子晶体光纤高灵敏度温度测量 [J]. *中国激光*, 2020, 47(4): 0404003.
- [75] Wang J P, Chen M H, Tan W J, et al. Dual-modality endoscopic probe for optical coherence tomography imaging and pH sensing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(9): 0907001. 王健平, 陈明惠, 谈维杰, 等. 用于 OCT 成像与 pH 测量的双模态内窥探头 [J]. *中国激光*, 2020, 47(9): 0907001.

Research Status of High-Precision Measurement Methods Based on Weak-Value Amplification

Xu Yang^{1,2}, Zhou Chongqi^{1,3*}, He Yonghong^{1,2**}

¹*Institute of Optical Imaging and Sensing, Shenzhen Key Laboratory for Minimal Invasive Medical Technologies, Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen, Guangdong 518055, China;*

²*Institute of Biopharmaceutical and Health Engineering, Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen, Guangdong 518055, China;*

³*Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

Abstract

Significance The weak-measurement (WM) theory was proposed by Aharonov et al. in 1988. We can obtain the measurement value that is much larger than the eigenvalue using the WM theory by appropriately adjusting the pre- and post-selection states and maintaining a small interaction intensity between the system under test and the

detector. The small interaction maintained here is what referred to as “weak” in the WM. In the process of weak interaction, an important parameter, named “weak value,” contained in the pointer state has always played an important role. Therefore, we call this process of significantly amplifying the actual parameters as the weak value amplification. However, because it is impossible to prove the existence of this “weak value” at the beginning, the WM theory has been questioned by the scientific community to the extent that some believed that the WM theory was an absurd idea. In 1989, Duck et al. re-explained the concept of WM, and then in 1991, Ritchie et al. verified the existence of weak values of key parameters in WM through experiments. Consequently, the WM theory is widely accepted.

Progress The WM theory provides a deeper explanation for quantum physics and shows potential for the precision measurement. However, in the next decade, WM development mainly revolved around the theoretical study, such as WM realization in some specific systems, related study on the pointer states in the WM systems, and the “weak value”. In this paper, we discussed important parameters, the WM techniques in classical and quantum physics, the prospect of applying WM techniques to the fields of high-precision measurement, and some other theoretical studies. After the first five years of the 21st century, the WM techniques have gradually showed their own unique properties in the measurement field. In 2005 and 2007, Pryde and Jozsa, respectively, implemented the WM experiments in polarization detection and measured the complex weak value. They explained in detail the physical meaning of the real and imaginary parts of the weak value in the actual measurement. The WM has been improved to the stage of high-precision measurement. In 2008, Hosten et al. reported a related WM work that studies the spin Hall effect of observing light in *Science*, which refocused the spotlight on the WM, the promising techniques. Owing to the high measurement accuracy and potential, the amplification mechanism of the WM can be used to observe the physical phenomena and detect the physical parameters.

Furthermore, several related theories since 2010 have shown that the WM performance in the frequency domain has more obvious detection advantages than other fields. Particularly, in 2011, Li group from the University of Science and Technology, China, proposed that white light could be used to achieve high-sensitivity detection of optical phase in the WM system. Two years later, they verified the WM through experiments, which laid the foundation for the WM applications in frequency domain optics. In 2016, He Yonghong group used broadband high-brightness super-luminescent diode as a light source and realized an optical frequency domain WM system with a wide range of general values. Compared with the traditional optical interference detection, the WM system is 1–2 orders of magnitude higher in detection accuracy.

Currently, the WM techniques are widely implemented in four fields including the time domain, frequency domain, spatial domain, and polarization angle distribution based on the requirement of different applications. Relevant study results show that the WM technique has good applicability and high measurement accuracy in these four fields. The representative work in each field is as follows:

- (1) Time-domain WM: single-photon tunneling time and observing the spin Hall effect of light.
- (2) WM in frequency domain: subpulse width time delay, temperature measurement, and phase shift.

(3) WM in the spatial domain: ultrasensitive beam deflection measurement, Goos-Hänchen displacement, WM techniques to improve the SPR resolution.

(4) Weak-polarization angle measurement: polarization rotation, beam deflection angle measurement, light polarization measurement, chiral molecule measurement, and deviation of the beam angle in reflection or refraction.

Conclusions and Prospects In this paper, we introduce two types of measurement methods combining weak-value amplification based on practical applications of the weak-value amplification in high-precision measurement. These methods are used to measure changes in physical quantities by analyzing the lateral offset and frequency shift of the beam. Based on these systems, the weak-value amplification can be combined with many traditional measurement methods to improve the resolution of the system. Finally, we discuss the development trend of weak-value amplification. Combining the traditional detection methods and weak-value amplification techniques to achieve higher system resolution, indicators are a direct application of the WM in high-precision measurement. Because the weak-value amplification techniques can excellently suppress technical noise, the existing WM system has a resolution of ~1–2 orders of magnitude improvement compared with that of the traditional system. The WM techniques have potential applications in the fields of biology and chemistry.

Key words measurement; weak-value amplification; high-precision measurement; lateral shift of beam; frequency shift

OCIS codes 130.6010; 120.5050