

维生素 B₂ 固体粉末荧光偏振特性及其检测

严肃源 张伟刚

(南开大学现代光学研究所, 光学信息技术教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要 将固体表面荧光法和荧光偏振测量相结合, 直接利用固体粉末进行荧光偏振检测, 研究了维生素 B₂ 固体粉末的荧光偏振度及其特性。实验结果表明, 维生素 B₂ 固体粉末的荧光偏振度受激发光入射角影响; 当样品粉末紧密度大于 0.6667 时, 紧密度不会对荧光偏振度产生影响。在激发光入射角为 45° 条件下其荧光偏振度为 0.4178。该结果为使用维生素 B₂ 水溶液进行荧光偏振检测的结果的 1.42 倍。对维生素 B₂ 固体粉末连续进行 6 h 照射激发, 其荧光偏振度检测结果在误差范围内保持稳定。

关键词 光谱学; 荧光偏振; 固体粉末; 维生素 B₂

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.0615001

Fluorescence Polarization Properties and Detection of Vitamin B₂ Solid Powder

Yan Suyuan Zhang Weigang

(Key Laboratory of Optical Information Science and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract Using solid powder directly, an approach to acquire the fluorescence polarization is demonstrated by combining solid surface fluorimetry and fluorescence polarization, and the fluorescence polarization properties of vitamin B₂ are researched with this method. The results show that the degree of fluorescence polarization of vitamin B₂ solid powder is dependent on the incident angle of the exciting light, and is independent of the relative compactness when it is greater than 0.6667. The degree of polarization hits 0.4178 while the incident angle is 45°. It is 1.42 times of that the detected result from the aqueous solution. The degree of fluorescence polarization of the vitamin B₂ solid sample keeps steadily in error band under constant illumination for 6 h.

Key words spectroscopy; fluorescence polarization; solid powder; vitamin B₂

OCIS codes 170.6280; 300.6490; 310.5448

1 引 言

荧光方法因其精确、灵敏、便捷等特点, 已被广泛应用于生化、医学和工业领域中的物质检测与分析。随着科学技术的发展和研究工作的不断深入, 低温荧光法、同步荧光法^[1]和荧光免疫法^[2]等方法相继被提出, 为荧光分析方法提供了更为广阔的应用空间。然而, 大部分荧光分析方法在使用前需先

将样品配置成溶液, 过程较繁琐; 若溶剂选取不当, 将导致样品发生化学变化, 进而影响检测结果。同时, 溶液中存在分子的布朗运动, 分子间碰撞造成能量损失, 以致减弱荧光信号的强度。因此, 对溶液进行荧光检测时, 需要对温度进行严格控制。1974 年, Wrighton 等^[3]提出固体表面荧光法。该方法无需对样品特殊处理, 具有快捷灵活、成本较低、受温度等外

收稿日期: 2012-01-13; **收到修改稿日期:** 2012-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(10974100, 10674075, 60577018)、天津市应用基础与前沿技术研究计划重点项目(10JCZDJC24300)和光学信息技术教育部重点实验室开放基金资助课题。

作者简介: 严肃源(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事光子技术及光通信等方面的研究。

E-mail: yansuyuan@gmail.com

导师简介: 张伟刚(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光子技术与现代光传感、新型光电子器件等方面的研究。

E-mail: zhangwg@nankai.edu.cn

界因素影响小等优点,更适用于工业生产之中,因而引起国内外研究人员的关注。杨仁杰等^[4~9]在这方面做了较有成效的工作,将固体表面荧光检测发展为固体粉末荧光检测,进一步提高了该技术的实用性。可将荧光检测技术与光纤技术相结合,制成高集成度的荧光检测仪器,实现无需单独取样且实时的无损测量^[10~12]。

需要指出的是,固体荧光法的测量结果受杂散光影响较大,其测量精度有时不及溶液荧光测量法所测的精度。为此,需尽可能多地利用被激发出的荧光信息。大量的荧光实验和分析表明,充分利用荧光的偏振信息,能够有效解决这一问题。鉴于散射和反射不会影响光线的偏振特性,若以偏振光作为激发光并在接收端设置检偏器,可有效减弱杂散光并提高荧光检测的精度。

1920年,Weigert等^[13]在小染色剂分子溶液中最先观察到荧光偏振现象。其后,Perrin^[14]将荧光偏振度与分子的转动和荧光寿命相关联,建立了荧光偏振理论。1952年,Weber^[15]拓展了荧光偏振理论,荧光偏振被广泛应用于生命科学、环境科学等领域。20世纪70~80年代,我国也展开了这方面的研究工作,20世纪90年代该方法在临床医学等方面已发挥重大作用^[16,17]。2005年,张天泰等^[18,19]将荧光偏振技术应用于药物高通量筛选,填补了我国在该技术领域的空白。

在实际荧光检测中,被测样品往往由多种成分构成,而不同成分的含量及其荧光效率不同,这将导致荧光光谱重叠。因此仅依据荧光光谱中的荧光强度和谱型变化等信息很难全面反映被测样品的细致特性。大量实验结果表明,对荧光偏振信息的定量分析能够有效提高被测样品的检测质量。本文将固体表面荧光法和荧光偏振法相结合,直接使用固体粉末进行荧光偏振测量。采用该方法对维生素B₂样品进行荧光偏振照射实验,与其水溶液荧光偏振的测算结果进行了比较,对固体粉末维生素B₂荧光偏振度做了检测。对维生素B₂连续进行6h照射激发,研究了荧光偏振度检测结果与误差范围的关系,讨论了该方法测量的重复性和稳定性。

2 实验装置与检测样品

荧光光谱仪为日本岛津RF-5301PC型,激发光源为150W氙灯,可产生波长范围在220~700nm之间的连续光谱。激发光经过由一个光栅和两个凹面镜构成的单色仪后进入样品室,计算机通过调节

光栅角度来实现对激发光连续光谱的单波长调节。激发出的荧光经过发射光单色仪后由光电探测器接收,经过数据采集卡最终传输至计算机,由专门的软件进行数据处理。仪器波长扫描范围为220~900nm。测量固体样品荧光时使用的样品支架为反射式,可通过转动样品池调节激发光的入射角,实验装置如图1所示。

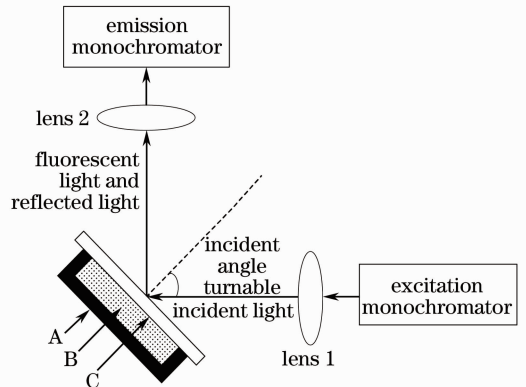


图1 固体样品荧光测量装置图

Fig. 1 Structure of fluorescence spectrometer for solid sample

实验样品维生素B₂(C₁₇H₂₀N₄O₆)购于天津市光复精细化工研究所,其含量为97.5%~102%。为了与溶液荧光法进行对比分析,使用电子天平(上海精科FA1204B型)称取15.3mg维生素B₂溶于100mL去离子水中,静置1h后取上层清液作对比实验备用。

3 荧光光谱测量原理与方法

固体表面荧光法的样品池可分为反射式和透射式两种,本文采用前一种方式。激发光照射到样品池表面后产生反射,部分反射光被探测器接收。为尽量降低激发光对荧光光谱的影响,在无偏振荧光检测时,通常取激发光入射样品池表面的入射角为30°^[20]。由于引入了偏振测量,起偏器和检偏器会大幅削弱激发光和荧光强度,因此取入射角为45°以获得足够强的荧光信号。

研究表明:在特定波长光的照射下,1)物质中的分子会吸收光子,并由基态最低能级跃迁至激发态不同能级;2)激发分子经过无辐射跃迁回到第一激发态最低能级;3)光子辐射回到基态,此时发出的光即为荧光。如果用一束线偏振光照射待测样品,样品中的分子吸收偏振态的光子,其荧光产生概率正比于荧光分子吸收电偶极矩与偏振态光子振动方向夹角余弦值的平方^[21,22],激发出的偏振态荧光

为部分偏振光。

为定量描述激发荧光的偏振特性,定义偏振度 P 为

$$P = \frac{I_{//} - I_{\perp}}{I_{\perp} + I_{//}}, \quad (1)$$

式中 $I_{//}$ 为平行于激发光偏振方向的荧光光强, I_{\perp} 为垂直于激发光偏振方向的荧光光强,如图 2 所示。

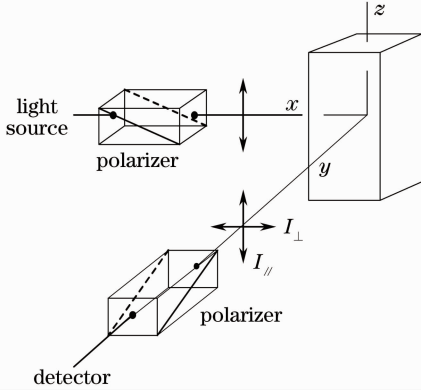


图 2 荧光偏振测量示意图

Fig. 2 Schematic diagram for measurement of fluorescence polarization

若不考虑分子自身的转动,则可由

$$\frac{1}{P_0} - \frac{1}{3} = \frac{5}{3} \left(\frac{2}{3\cos^2 \phi - 1} \right) \quad (2)$$

求得荧光偏振度值 P_0 , 式中 ϕ 为吸收电偶极矩与发射电偶极矩间夹角。在理想情况下,给定分子的荧光偏振度应该是一个确定的值,与外界因素无关。事实上,样品分子在吸收光子跃迁后经 10^{-8} s 才能够返回基态。对于溶液而言,其分子存在自旋,荧光产生过程中分子本身有一定角度的转动,因此需对(2)式添加一个修正项。Perrin^[14] 将荧光分子的运动与激发态寿命和转动扩散进行联系,提出适用于溶液的 Perrin 方程,为

$$\frac{1}{P} - \frac{1}{3} = \left(\frac{1}{P_0} - \frac{1}{3} \right) \left(1 + \frac{RT}{\eta V \tau} \right), \quad (3)$$

式中 V 为荧光分子转动时的有效摩尔体积, R 为荧光分子转动速率, η 为溶液粘度, τ 为激发态寿命。由(3)式可见,对给定的荧光分子,溶液粘度越大,分子转动速率越小,偏振度测量值与理论值越接近。因为溶液中存在剧烈的布朗运动,分子间碰撞导致的能量转移和荧光分子自身对荧光的重吸收作用均能导致偏振度降低,所以溶液配制需使溶液浓度尽量小、粘度尽量大,以便获得最接近分子荧光偏振度理论值的值。同时,荧光分子浓度对荧光强度也会产生影响,将增大溶液配比选择的复杂性。

为解决这一问题,选择固体粉末作为样品。对

于固体而言,分子随机运动极其微弱,分子间碰撞导致的能量转移可忽略不计。对比分析(3)式,由于固体荧光分子转动速率 R 极小,可认为趋近于零,于是,(3)式右边的修正项近似为 1,即 P 近似等于 P_0 。

4 维生素 B₂ 荧光偏振测量与分析

4.1 维生素 B₂ 水溶液和固体粉末荧光偏振特性测量与对比分析

1) 对维生素 B₂ 水溶液进行荧光光谱测量。取已制备的维生素 B₂ 实验溶液样品 3 mL,置于比色皿内测量荧光光谱。440~490 nm 激发光下激发产生的荧光光谱如图 3 所示。其中,峰 1 为水的瑞利散射峰,峰 2 为维生素 B₂ 的荧光峰。

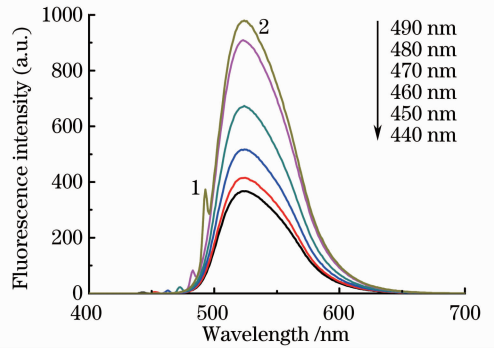


图 3 维生素 B₂ 水溶液荧光光谱

Fig. 3 Fluorescence spectra of aqueous solution of vitamin B₂

2) 对维生素 B₂ 固体粉末进行荧光光谱测量。取 450 ± 10 mg 维生素 B₂ 固体粉末样品均匀置于固体样品池中,使用图 1 所示的实验装置进行荧光光谱实验,经过数据处理滤去无用的激发光反射光谱信息,得到测量结果如图 4 所示。对比维生素 B₂ 水溶液荧光光谱,维生素 B₂ 固体粉末的荧光强度较弱,荧光峰中心波长略有红移,这是由于在水溶液中维生素 B₂ 分子未成键的氮原子与水中氢离子结合

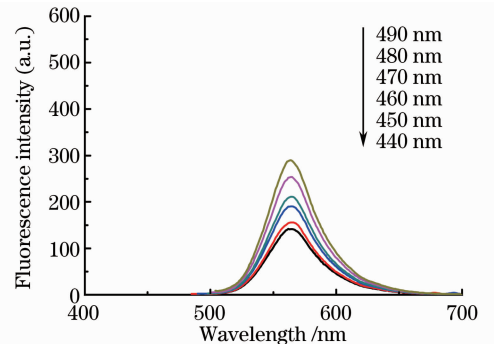


图 4 维生素 B₂ 固体粉末荧光光谱

Fig. 4 Fluorescence spectra of vitamin B₂ solid powder

后导致能级降低造成的。

3) 对维生素 B₂ 水溶液进行荧光偏振度测量。取维生素 B₂ 水溶液 5 份, 每份 3 mL, 分别进行荧光偏振度测量。为了减小水的瑞利散射对维生素 B₂ 荧光光谱的影响, 同时又能保证获得的荧光足够强, 选取激发光波长为 480 nm。调节检偏器的检偏角为 0° 和 90° 时分别测量得到荧光光谱, 结果如图 5 所示。从 500 nm 到 700 nm 分别对两光谱的面积积分, 得到两不同检偏角下的荧光强度, 并根据(1)式计算荧光偏振度。平均 5 份样品结果, 得到 480 nm 激发光下维生素 B₂ 溶液荧光偏振度为 0.2937。表 1 给出了维生素 B₂ 水溶液荧光偏振度实验结果。

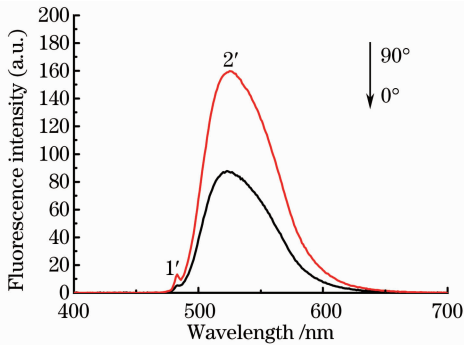


图 5 维生素 B₂ 水溶液偏振荧光光谱

Fig. 5 Fluorescence polarization spectra of aqueous solution of vitamin B₂

4) 对维生素 B₂ 固体粉末进行荧光偏振度测

表 2 不同入射角度下维生素 B₂ 固体粉末荧光偏振度实验结果

Table 2 Degree of fluorescence polarization of solid powder of vitamin B₂ at different incident angles

Number	Degree of fluorescence polarization							
	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°
1	0.4920	0.4596	0.4298	0.4190	0.4175	0.4081	0.3811	0.3491
2	0.4841	0.4561	0.4284	0.4239	0.4180	0.4047	0.3666	0.3557
3	0.4819	0.4551	0.4263	0.4187	0.4178	0.3970	0.3669	0.3532

由表 2 可见, 当入射角在 25°~60° 之间变化时, 维生素 B₂ 固体粉末的荧光偏振度随入射角的增大而逐渐减小。考虑到偏振器件的引入会削弱激发光及荧光的强度, 为获得尽量强的荧光信号, 在实验中选择入射角为 45°, 对维生素 B₂ 固体粉末荧光偏振特性进行研究。

另取维生素 B₂ 固体粉末样品 5 份, 每份 450 ± 10 mg, 在 45° 入射角条件下进行荧光偏振度测量。计算过程与第 3) 步相同, 得到 490 nm 激发光下固体维生素 B₂ 粉末的荧光偏振度为 0.4178, 荧光偏振光谱图如图 6 所示。维生素 B₂ 固体粉末荧光偏振度的实验结果见表 1。

对比第 3)、4) 步实验结果, 检偏角取 0° 时, 维生

表 1 维生素 B₂ 水溶液和固体粉末荧光偏振度实验结果

Table 1 Degree of fluorescence polarization of aqueous solution and solid powder of vitamin B₂

Number	Degree of fluorescence polarization	
	Aqueous solution	Solid powder
1	0.2942	0.4190
2	0.2933	0.4173
3	0.2936	0.4172
4	0.2927	0.4177
5	0.2945	0.4176
Average	0.2937	0.4178
Standard deviation	7.16×10^{-4}	7.23×10^{-4}
Variance	4.10×10^{-7}	4.18×10^{-7}

量。取维生素 B₂ 固体粉末样品 3 份, 每份 450 ± 10 mg, 在不同入射角情况下进行荧光偏振度测量。为了减小反射的激发光对测量结果的影响, 同时获得足够强的荧光, 选取激发光波长为 490 nm。对少量样品, 荧光的强度正比于样品质量^[23], 且样品颗粒大小和压紧程度对荧光光强的影响仅为 0.5% 左右^[24]。因为荧光偏振度取决于两相互垂直检偏角下测得的偏振荧光的强度的比值, 所以样品质量微小变动导致的荧光强度变化不会对荧光偏振度的实验结果造成影响。调节固体样品池的角度, 使激发光入射角在 25°~60° 之间变化。每份样品在每个角度处各测量 5 次, 对结果取平均。3 份样品在不同入射角度下的荧光偏振度如表 2 所示。

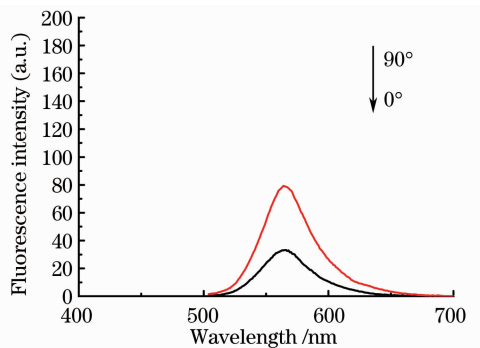


图 6 维生素 B₂ 固体粉末偏振荧光光谱

Fig. 6 Fluorescence polarization spectra of vitamin B₂ solid powder

素 B₂ 水溶液偏振荧光强度为固体粉末偏振荧光强

度的 3.00 倍;检偏角取 90°时,维生素 B₂ 水溶液偏振荧光强度为固体粉末偏振荧光强度的 2.25 倍。用水溶液进行荧光检测时,3 mL 样品中仅含约 0.5 mg 维生素 B₂,其质量远小于用固体粉末进行检测时所使用的 450 mg。显然,维生素 B₂ 水溶液的荧光效率更高,若用荧光强度对维生素 B₂ 进行分析,直接使用维生素 B₂ 固体粉末进行荧光检测与其水溶液进行检测相比并不具有优势。若从荧光偏振度的角度考查,根据(1)式及第 4)步中的分析,因为荧光偏振度是一个比值,所以荧光的绝对强度大小不会对荧光偏振度造成影响。进一步研究并对比第 3)、4)步实验结果,直接测量维生素 B₂ 固体粉末获得的荧光偏振度值是其水溶液样品相应测量值的 1.42 倍。对比分析显示,二者 5 次测量统计的方差量级相同(如表 2 所示),表明该方法能够用于固态粉末的荧光偏振检测,且具有测量便捷、重复性好的

表 3 不同相对紧密度条件下维生素 B₂ 固体粉末荧光偏振度实验结果

Table 3 Degree of fluorescence polarization of solid powder of vitamin B₂ with different relative compactness

Quality of sample /mg	381.5	400.7	425.1	451.0	478.1	504.8	545.6	589.3
Relative compactness	0.9961	0.9483	0.8939	0.8426	0.7948	0.7528	0.6965	0.6667
Degree of polarization	0.4174	0.4175	0.4181	0.4179	0.4176	0.4179	0.4177	0.4179

考虑样品池架能给予的最大压力,为保证样品池处于密闭状态,填入的粉末样品体积在未施力状态时不大于 1.5 mL,即样品填入样品池后可达到的最小紧密度为 0.6667。由表 3 可见,当紧密度在 0.9961~0.6667 范围内变化时,维生素 B₂ 的荧光偏振度保持稳定。

4.3 维生素 B₂ 固体粉末荧光偏振稳定性分析

维生素 B₂ 受光照会产生分解,为检测其在持续

优点。

4.2 样品粉末相对紧密度对维生素 B₂ 固体粉末荧光偏振度的影响

通常荧光光谱仪配备的固体测试用样品池的容积是固定的,若向样品池中填入不同的样品粉末量,则样品的紧密程度就会有差别。紧密度 D 定义为

$$D = V/V_0, \quad (4)$$

式中 V 为材料在绝对密实状态下的体积, V_0 为材料在自然状态下的体积。由于重力等作用力的影响,颗粒之间可能会存在微弱的作用力,假定当 380 mg 维生素 B₂ 粉末样品均匀置于 1 mL 空间中时,其相对紧密度为 1。鉴于样品池容积是固定的(1 mL),实验中采用改变单位体积样品粉末质量的方式以获得不同的相对紧密度并进行测量。实验时每份样品测 5 次取平均值,结果如表 3 所示。

光照条件下荧光强度及荧光偏振度的变化,取其固体粉末样品和水溶液样品各 3 份分别用第 3)、4)步的方法进行了检测,每隔 10 min 测算一次荧光偏振度,持续激发 6 h,每种方法在同一时间点得到的 3 个数据取平均为该时刻的荧光偏振度,结果分别如图 7、8 所示。可见,在激发光的持续照射下,维生素 B₂ 粉末的荧光强度会不断减弱,而水溶液的荧光强度在实验初期略有波动,之后则保持稳定。

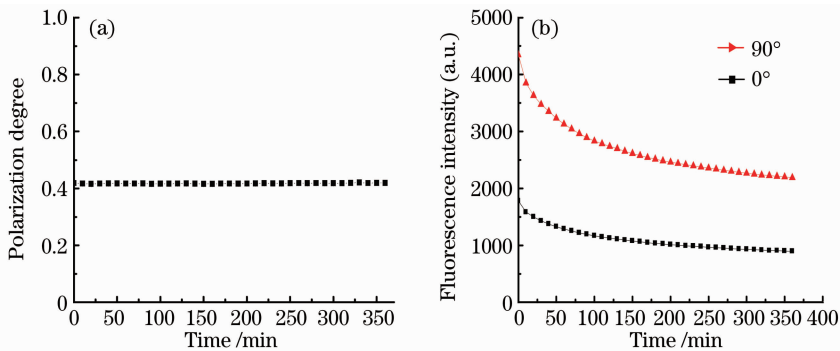


图 7 维生素 B₂ 粉末样品。(a)偏振度和(b)荧光强度随时间变化

Fig. 7 Time dependence of (a) polarization degree and (b) intensity of the fluorescence spectra of vitamin B₂ powder

样品的荧光偏振度误差分析表明,固体粉末样品直接进行荧光偏振检测的相对误差不超过 0.54%,水溶液样品的荧光偏振检测相对误差小于

0.66%,这表明固体对维生素 B₂ 粉末的测量方法具有良好的可重复性。稳定性实验表明,在维生素 B₂ 固体粉末样品进行 6 h 持续激发照射的条件下,荧

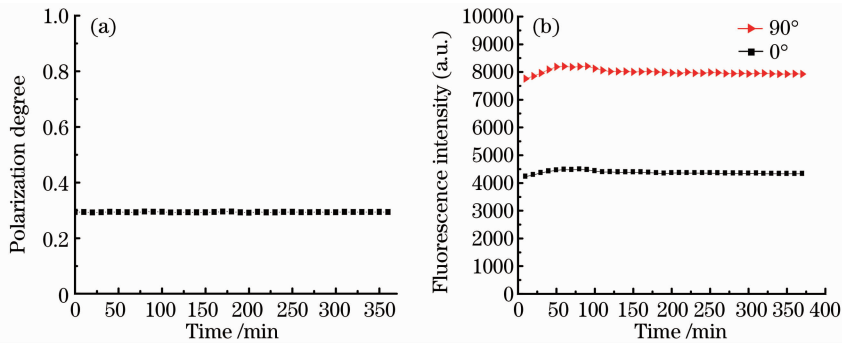


图 8 维生素 B₂ 水溶液样品(a)偏振度和(b)荧光强度随时间变化

Fig. 8 Time dependence (a) polarization degree and (b) intensity of the fluorescence spectra of aqueous solution of vitamin B₂

光偏振度仍然具有很好的稳定性,如图 7(a)所示。

5 结 论

将固体表面荧光法和荧光偏振测量结合,直接对固体粉末进行荧光偏振度测量。采用该方法对维生素 B₂ 固体粉末荧光偏振特性进行了研究。维生素 B₂ 固体粉末荧光偏振度与激发光的入射角有关;在 25°~60°范围内,荧光偏振度随入射角的增大而减小;当样品粉末的相对紧密度大于 0.6667 时,维生素 B₂ 固体粉末的荧光偏振度不受相对紧密度的影响。对 45°入射角情况进行深入研究,此时维生素 B₂ 固体粉末的荧光偏振度为 0.4178,为水溶液的荧光偏振度的 1.42 倍。对维生素 B₂ 固体粉末持续进行 6 h 激发光照射,荧光强度持续减弱,但荧光偏振度则保持平稳。测算固体粉末荧光偏振能够有效提高荧光偏振测量值,具有测量便捷、重复性好和稳定性高等优点,可望应用于环境监测、食品安检和医药分析等领域。

致谢 感谢南开大学现代光学研究所常胜江教授和王湘晖副教授对本文实验部分的支持。

参 考 文 献

- 1 J. B. F. Lloyd. Synchronized excitation of fluorescence emission spectra[J]. *Nature Physical Science*, 1971, **231**(5): 64~65
- 2 A. Warsinke, A. Benkert, F. W. Scheller. Electrochemical immunoassays[J]. *Fresenius J. Anal. Chem.*, 2000, **366**(6-7): 622~634
- 3 M. S. Wrighton, D. S. Giniey, D. L. Morse. A technique for determination of absolute emission quantum yields of powdered samples[J]. *J. Phys. Chem.*, 1974, **78**(22): 2229~2233
- 4 Yang Renjie, Xu Xiaoxuan, Shang Liping *et al.*. Solid powder fluorescence of oil cuttings[J]. *Chinese J. Luminescence*, 2005, **26**(1): 131~134
- 杨仁杰, 徐晓轩, 尚丽平等. 含油岩屑固体粉末荧光的研究[J]. *发光学报*, 2005, **26**(1): 131~134
- 5 Zhang Chunyan, Zhang Weigang, Wang Chao *et al.*. Direct

- inspecting of solid powder fluorescence of oil cuttings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 918~922
- 张春艳, 张伟刚, 王超等. 含油岩芯固体粉末荧光光谱的直接检测[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 918~922
- 6 Peng Xuesong, Zhang Weigang, Zhang Chunyan *et al.*. Fluorescence determination of vitamin B₆ in solid flour[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2011, **22**(4): 566~569
- 彭雪松, 张伟刚, 张春艳等. 固态面粉中维生素 B₆ 的荧光法直接测定[J]. *光电子·激光*, 2011, **22**(4): 566~569
- 7 Liu Chunyang, Sun Lidong, Fu Xing *et al.*. Si microstructure fabricated by 355 nm nanosecond pulsed laser and its fluorescence microscopy study [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2139~2142
- 刘春阳, 孙立东, 傅星等. 355 nm 纳秒脉冲激光在硅表面照射形成微结构及其荧光检测[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2139~2142
- 8 Li Zilei, Wang Lin, Pang Qichang *et al.*. Panax quinquefolium's active ingredients detecting method based on LCTF spectrograph [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3622~3626
- 李子雷, 王琳, 庞其昌等. 基于液晶光谱仪的西洋参品质荧光检测方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3622~3626
- 9 Zhuang Renzhong, Lai Guozhong, Lin Fuzhong *et al.*. Growth and spectral properties of calcium molybdate laser crystal doped with erbium ion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3108~3111
- 庄任重, 赖国忠, 林福忠等. 掺铒钼酸钙激光晶体的生长与光谱研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 3108~3111
- 10 U. Utzinger, R. R. Richards-Kortum. Fiber optic probes for biomedical optical spectroscopy[J]. *J. Biomed. Opt.*, 2003, **8**(1): 121~147
- 11 A. E. Eroglu, M. Volkan, O. Y. Ataman. Fiber optic sensors using novel substrates for hydrogen sulfide determination by solid surface fluorescence[J]. *Talanta*, 2000, **53**(1): 89~101
- 12 Wang Yutian, Hu Qiaoli, Shi Junyan. Optical fiber thermometer based on fluorescence mechanism[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 655~659
- 王玉田, 胡俏丽, 石军彦. 基于荧光机理的光纤温度测量仪[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 655~659
- 13 F. Weigert, G. K ppler. Polarisierte fluoreszenz in farbstoffl sungen[J]. *Zeitschrift f r Physik A Hadrons and Nuclei*, 1925, **25**(1): 99~117
- 14 F. Perrin. Polarization de la lumi re de fluorescence. vie moyenne des mol cules dans l'etat excite[J]. *J. Phys. Radium*, 1926, **7**(12): 390~401
- 15 G. Weber. Polarization of the fluorescence of macromolecules [J]. *Biochemical Journal*, 1952, **51**(2): 145~167
- 16 Peng Changde, Liu Ying, Lan Xiufeng *et al.*. Research on static fluorescence polarization spectrum of whole blood [J]. *Acta*

- Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1543~1548
- 彭长德, 刘莹, 兰秀凤等. 血液静态荧光偏振光谱研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10): 1543~1548
- 17 Liu Ying, He Wenliang, Liu Cheng. Research on the fluorescence polarization characteristic of alcoholism blood[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2065~2068
- 刘莹, 何文亮, 刘诚. 乙醇中毒血液荧光偏振特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2065~2068
- 18 Zhang Tiantai, Du Guanhua. Application of fluorescence polarization-based assay in high throughput screening[J]. *Acta Pharmaceutica Sinica*, 2005, **40**(4): 289~293
- 张天泰, 杜冠华. 极化荧光在高通量药物筛选中的应用[J]. *药学学报*, 2005, **40**(4): 289~293
- 19 Wang Jinhua, Han Guangliang, Zhang Tiantai *et al.*. A high-throughput fluorescent polarization model for screening EPO receptor ligand[J]. *Chinese Pharmacological Bulletin*, 2006, **22**(1): 114~117
- 王金华, 韩光亮, 张天泰等. 基于 FP 法的 EPOR 配体高通量筛选模型[J]. *中国药理学通报*, 2006, **22**(1): 114~117
- 20 M. Zandomenighi. Fluorescence of cereal flours[J]. *J. Agric. Food Chem.*, 1999, **47**(3): 878~882
- 21 T. L. Mann, U. J. Krull. Fluorescence polarization spectroscopy in protein analysis[J]. *Analyst*, 2003, **128**(4): 313~317
- 22 D. M. Jameson, J. A. Ross. Fluorescence polarization/anisotropy in diagnostics and imaging[J]. *Chem. Rev.*, 2010, **110**(5): 2685~2708
- 23 A. B. Moreira, H. P. M. Oliveira, T. D. Z. Atvars *et al.*. Direct determination of paracetamol in powdered pharmaceutical samples by fluorescence spectroscopy[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2005, **539**(1-2): 257~261
- 24 M. Zandomenighi, L. Carbonaro, L. Calucci *et al.*. Direct fluorometric determination of fluorescent substances in powders: the case of riboflavin in cereal flours[J]. *J. Agric. Food Chem.*, 2003, **51**(10): 2888~2895

栏目编辑: 李文喆