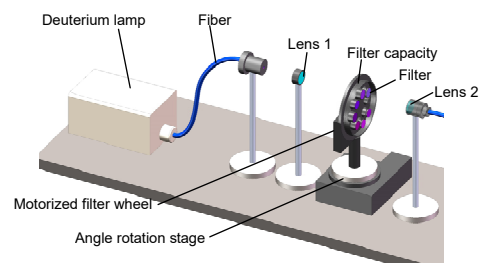


DOI: 10.12086/oe.2021.210173

波长可调谐深紫外窄带光源模块的设计及验证

俞凯雄^{1†}, 朱星玥^{1†}, 吴 铸^{1,2*}¹ 山东大学海洋研究院, 山东 青岛 266237;² 德州尧鼎光电科技有限公司, 山东 德州 253000

摘要: 本文提出了一种中心波长连续可调的光源模块, 实现了深紫外光源的窄带输出。设计的光源模块由氘灯、角度旋转台、滤光片旋转轮、不同中心波长的滤光片(220 nm, 230 nm, 240 nm, 250 nm, 260 nm, 270 nm, 280 nm)和光学透镜组成。基于多光束干涉理论, 通过分析出射光的中心波长和入射角度之间的关系, 得到了由每个滤光片出射的中心波长和角度旋转台旋转角度之间的定标关系式。实验结果表明, 当角度旋转台入射角范围在 0~30°时, 每个滤波片的可调谐范围可达到 10 nm, 实现紫外光源模块的单色光可调谐范围 212 nm~280 nm, 能满足海水中硝酸盐浓度的测量要求。

关键词: 窄带光源; 紫外波长可调; 滤光片; 多光束干涉; 硝酸盐测量

中图分类号: TN212; TN23

文献标志码: A

俞凯雄, 朱星玥, 吴铸. 波长可调谐深紫外窄带光源模块的设计及验证[J]. 光电工程, 2021, 48(8): 210173

Yu K X, Zhu X Y, Wu C. Design and experiment of a tunable narrow-passband deep UV light source[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(8): 210173

Design and experiment of a tunable narrow-passband deep UV light source

Yu Kaixiong^{1†}, Zhu Xingyue^{1†}, Wu Chi^{1,2*}¹Institute of Marine Science and Technology, Shandong University, Qingdao, Shandong 266237, China;²Aixsensor Co., Dezhou, Shandong 253000, China

Abstract: A deep UV tunable narrow-passband light source module for the nitrate measurement system is proposed and demonstrated in this paper. The module consists of a deuterium lamp, an angle rotation stage, a motorized filter wheel, the deep UV optical filters with different central wavelengths, as well as the collimating lens. Seven UV filters with different central wavelengths of 220 nm, 230 nm, 240 nm, 250 nm, 260 nm, 270 nm and 280 nm are placed on the filter wheel. Based on the principle of multiple-beam interference, the central wavelength of the transmission light

收稿日期: 2021-05-27; 收到修改稿日期: 2021-07-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1408600); 中国博士后科学基金(2019M662365); 山东省自然科学基金青年基金(ZR2020QD086); 山东省重点研发计划项目(2019JZZY020711, 2018YFJH0702); 山东省新旧动能转换重大工程重大课题攻关项目(S190401010001); 青岛市博士后研究人员应用项目资助。

作者简介: 俞凯雄(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事光电传感器设计方面的研究。E-mail: 201916201@mail.sdu.edu.cn

朱星玥(1990-), 女, 博士后, 主要从事光电传感器设计方面的研究。E-mail: zhuxingyue@sdu.edu.cn

†同等贡献作者

通信作者: 吴铸(1963-), 男, 博士, 教授, 主要从事基于光电集成芯片的海洋传感器的研究与产业化。E-mail: qi.wu@sdu.edu.cn

版权所有©2021 中国科学院光电技术研究所

and the rotation angle are regressed and calibrated to obtain the relationship model. The experiment results demonstrate that with the rotation angle from 0 to 30°, each filter can realize wavelength tuning range of 10 nm. In addition, the designed deep UV tunable light source module can obtain monochromatic light with the wavelength ranging from 212 nm to 280 nm, which meets the measurement requirements of the nitrate in seawater.

Keywords: narrowband light source; deep UV tunable wavelength; optical filter; multiple-beam interference; nitrate measurement

1 引言

硝酸盐与海洋生态污染有密切的联系,检测海水中的硝酸盐浓度对海洋环境研究具有重要意义^[1]。深紫外光谱分析法是一种现场原位测量海水中硝酸盐浓度的方法,因其无需进行前期处理,测量方便,可以快速获取数据的优点,已成为海水硝酸盐浓度测量的重要手段,且许多商用的基于深紫外光谱法的硝酸盐传感器已经被广泛地应用于海洋监测领域^[2]。

海水的成分非常复杂,大多数成分都会在深紫外波段产生吸收,例如溴离子、氯离子、有机物以及硝酸盐等^[3]。目前,基于深紫外光谱分析法的硝酸盐传感器都是基于朗伯-比尔定律进行测量^[4]。基于该定律,光源入射光的单色性越好,测量得到的数据越准确^[5]。然而,现在商用的硝酸盐传感器都是利用深紫外宽带光源进行测量^[6],从而导致测量结果的不准确。例如,在实际的应用中,海鸟公司的 SUNA 硝酸盐传感器在不同海域的测量误差大于其技术手册中的参考值^[7]。因此,设计一种可以在深紫外波段范围具有波长可调的窄带光源,对于提高硝酸盐测量的准确性具有重要意义。大量研究证明,210 nm~280 nm 波段范围内的光谱数据已经可以对海水中硝酸浓度进行较好的测量^[8-9]。由于深紫外光谱分析法是根据吸光度对硝酸盐进行计算,入射光强的稳定性会对测量结果造成

影响,因此需要选择光强稳定的光源;同时,测量系统需要在小功率下具有相对较大光强的光源,这样的光源具有较高的信噪比,使得有效信号不容易被淹没在背景噪声中^[10]。紫外激光二极管、紫外发光二极管都是比较成熟的紫外光源^[11],但是没有可以完全覆盖 210 nm~280 nm 波段的高功率产品;氙灯作为一种紫外气体光源,光谱范围为 190 nm~400 nm,发射功率大,且稳定性较好,已被广泛应用于紫外光谱测量中。

本文选择氙灯作为光源,基于介质薄膜滤光片的多光束干涉原理,对氙灯的出射光进行滤波,设计了中心波长可调谐的深紫外窄带光源模块。为了满足在宽波段(210 nm~280 nm)内中心波长可调谐、单色性好的要求,在光源模块中使用了 7 个不同中心波长的深紫外滤光片,通过实验测量得到了每个滤光片的旋转角度与出射光中心波长之间的关系,并通过上位机软件分别控制角度旋转台和滤光片转轮,最终实现中心波长在深紫外范围内的自动连续输出。

2 中心波长调谐原理

平行平板的干涉原理如图 1 所示。光信号以入射角 θ 从折射率为 n_0 的介质中入射到折射率为 n_1 的平行平板中,折射角为 θ' 。在平板的下表面 B 点,一部分光发生折射进入折射率为 n_0 的介质,一部分发生反射到上表面 D 点,并再次发生折射与反射,折射的光从

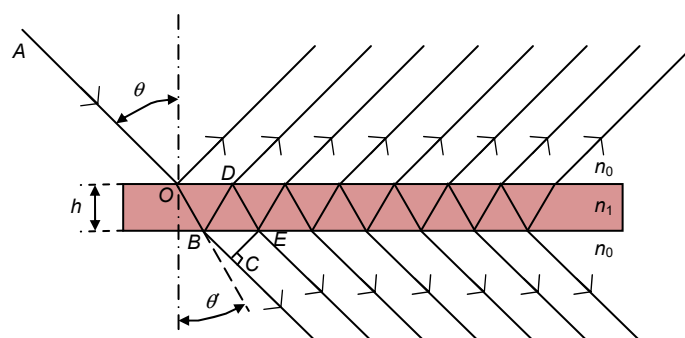


图 1 多光束干涉原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the multiple-beam interference

平板的上表面进入折射率 n_0 的介质, 反射的光则再次在下表面发生折射与反射, 如此循环, 最终有多束光在平行平板下表面出射并进入折射率为 n_0 介质。

在图 1 中, $EC \perp BC$, 任何相邻的两束光的光程差 δ 都可以等效为

$$\delta = n_1(BD + DE) - n_0 BC \quad (1)$$

根据几何关系和光传播规律可以得到:

$$BD = DE = \frac{h}{\cos \theta'} \quad (2)$$

$$BE = 2h \tan \theta' \quad (3)$$

$$BC = BE \sin \theta = 2h \tan \theta' \sin \theta \quad (4)$$

根据折射定律可以得到:

$$n_0 \sin \theta = n_1 \sin \theta' \quad (5)$$

结合以上公式, 可以得到光程差:

$$\delta = 2n_1 h \cos \theta' \quad (6)$$

对应相位差 $\Delta \varphi$:

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{4\pi n_1 h \cos \theta'}{\lambda} \quad (7)$$

式中: λ 为波长。根据光干涉原理, 当两束光的相位差为波长的整数倍时, 此波长的光被干涉增强^[12]。滤光片就是基于这个原理来增强特定波长的光强, 削弱其余波长的光强。由式(7)可知, 光束经过平行平板后, 出射光束之间的相位差与介质的折射率 n_1 、膜片厚度 h 以及折射角 θ' 有关。对于特定的薄膜滤光片, 折射率 n_1 和膜片厚度 h 都是常数, 而折射角 θ' 与入射角 θ 有关:

$$n \sin \theta = N \sin \theta' \quad (8)$$

式中: N 为滤光片的等效折射率, n 为空气的折射率, 通过改变入射光的入射角可以改变出射光的中心波长。假设相邻两束光的相位差 $\Delta \varphi = 2k\pi$, 将式(7)带入式(8)为可以推导得到:

$$\lambda = \frac{1}{k} \times 2hN \sqrt{1 - \left(\frac{n \sin \theta}{N} \right)^2} \quad (9)$$

当垂直入射时, 入射角为 0° , 中心波长 λ_0 为^[13]

$$\lambda_0 = \frac{2hN}{k} \quad (10)$$

结合式(9)和式(10), 可以得入射角与出射光的中心波长关系式为

$$\lambda = \lambda_0 \sqrt{1 - \left(\frac{n \sin \theta}{N} \right)^2} \quad (11)$$

式(11)得到了窄带干涉型滤光片在斜入射时, 透射光的中心波长和入射角之间的关系模型, 也从理论角度证明了紫外光源模块实现中心波长连续调谐的可行性。

3 可调谐紫外光源模块设计

3.1 硬件设计

可调谐紫外光源模块的系统结构如图 2 所示, 实物图如图 3 所示。该模块主要由氘灯(deuterium lamp, DH2000, Ocean Optics)、滤光片转轮(motorized filter wheel, Edmund Optics)、角度旋转台(angle rotation stage, URS100BPP, Newport)、七个不同中心波长的滤光片(#67-735, #67-736, #67-738, #67-740, #67-743, #67-745, #67-746, Edmund Optics)、准直透镜和紫外光纤等组成。氘灯产生的宽光谱光信号经光纤传输并由透镜(lens 1)准直, 以一定的角度入射到紫外滤光片。由于滤光片的干涉加强, 出射光是具有较窄半峰宽的单色光。使用不同中心波长的滤光片或者改变光的入射角都会改变出射光的中心波长, 从而实现紫外光源出射光的中心波长可调谐功能, 最终再由聚焦透镜(lens 2)汇聚耦合到光纤出射。

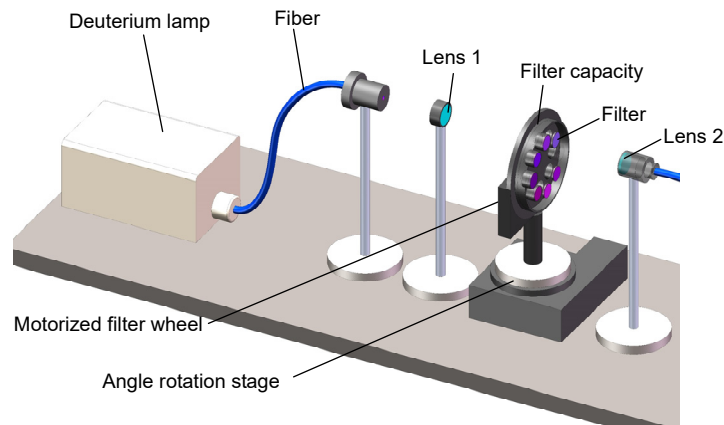


图 2 紫外可调谐光源模块原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the UV tunable light source module

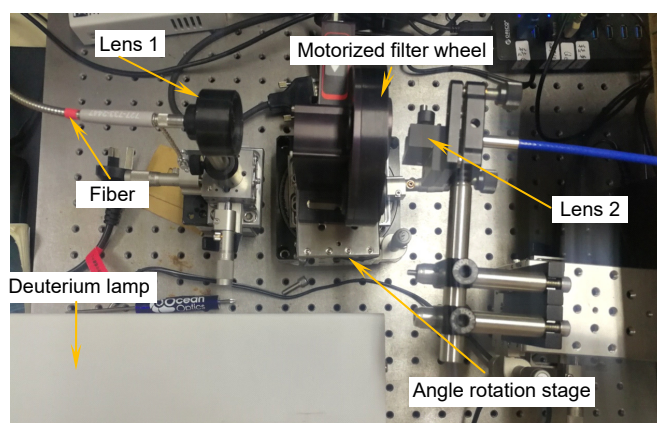


图 3 实验装置图

Fig. 3 Experimental equipment

3.2 光源控制软件设计

紫外光源模块通过控制入射光与不同滤光片法向之间的入射角来实现中心波长的调谐, 因此需要有序地更换不同中心波长的紫外滤光片, 并且精确地控制入射光与滤光片之间的入射角。滤光片固定在滤光片转轮上, 通过 RS232 协议^[14]向滤光片转轮发送指令来更换通光孔中的滤光片; 光源模块通过角度旋转台来控制滤光片与入射光之间的入射角, 实验中设定角度旋转台每次旋转 0.25° 。为了实现滤光片转轮与角度旋转台之间的位置配合, 采用 C++ 语言以及 Qt Creator 界面框架^[15-16], 搭建可视化的上位机界面程序, 通过

RS232 通信协议来实现上位机对滤光片旋转轮与角度旋转台的控制, 以及二者之间的功能配合。具体程序的流程图和控制界面如图 4 所示。

控制程序启动后可以通过界面上的控件, 根据 RS232 协议对串口进行配置; 然后进行位置初始化, 使得水平旋转台以及滤光片转轮都位于设定的初始位置。定时器延时一定时间后, 在每次水平转台或滤光片转轮已经到达目标位置时, 系统才开始采集数据; 通过判断水平转台与滤光片旋转轮的位置, 确定是否还需要进行下一次的数据采集, 从而保证测量数据的准确性。

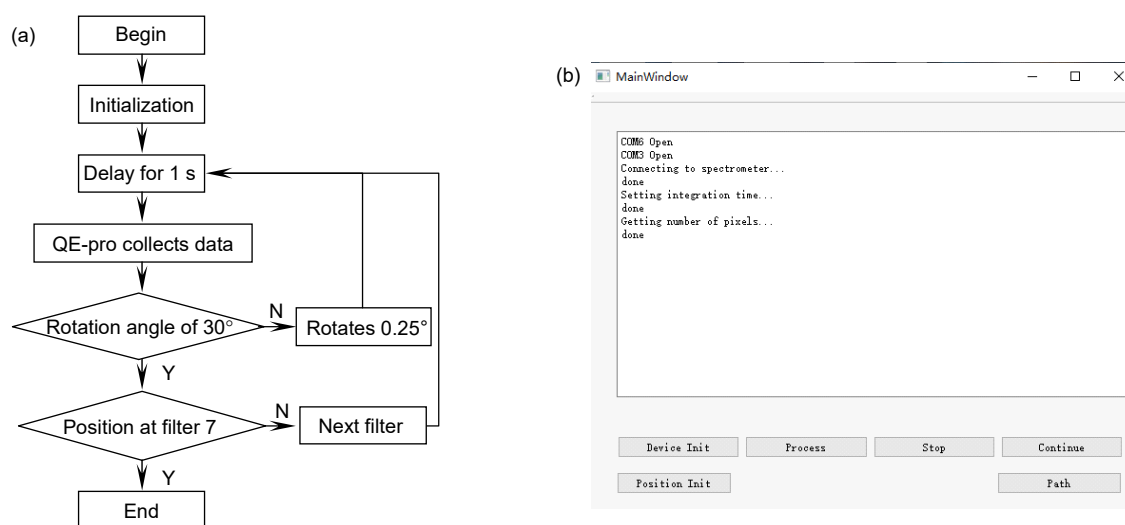


图 4 光源控制软件。(a) 软件控制流程图; (b) 可视化控制界面

Fig. 4 The control program. (a) Flow charts; (b) Interface

4 实验与结果分析

4.1 基于可调谐光源模块的测试系统

研制的基于可调谐光源模块的硝酸盐测试系统如图 5 所示, 其中滤光片转轮中有一个孔没有置放深紫外滤光片, 而被用于测量宽光谱光源条件下的光信号, 并与窄带光源测得的数据进行比较分析。实验时将超纯水和含有不同硝酸盐含量的海水样本放入样品槽中, 紫外光源模块出射的光经光纤入射到样品槽溶液中, 光信号由反光探头反射回光纤并传输到光谱仪中进行数据采集和后续的光源模块性能分析。反射探头的光程设置为 1 cm。

4.2 紫外滤光片性能分析

不同中心波长的紫外滤光片对光源的透过率不同, 使得最终出射的窄带光光强不同。在测量过程中, 需要对每个滤光片的透射光的光强进行分析, 以保证

采集数据的准确性。图 6 显示了经过不同滤光片所测得的光强值。从图中可以看出, 测量的光谱存在明显的噪声, 主要的原因如下: 1) 在实验过程中光源的光强会发生一定量的漂移; 2) 系统暗电流的影响; 3) 滤光片镀膜工艺的误差。因此, 需要对采集的光谱数据卷积平滑滤波, 平滑后的光谱如图 6 所示。在不考虑噪声的情况下, 可以认为光谱数据中光强最大值所对应的波长即为中心波长值。结果表明, 原始数据进行平滑后, 得到的光谱形状和中心波长的位置基本不变, 但是峰值强度会有一些减小。

4.3 滤光片的中心波长与角度标定

由于在滤光片装载过程中无法保证其初始状态与入射光之间是否为完全垂直入射, 即无法确定初始位置的入射角度, 因此, 需要标定角度旋转台的旋转角和出射中心波长之间的关系。基于波长调谐原理及式 (11), 出射的中心波长 λ 可由如下公式表示:

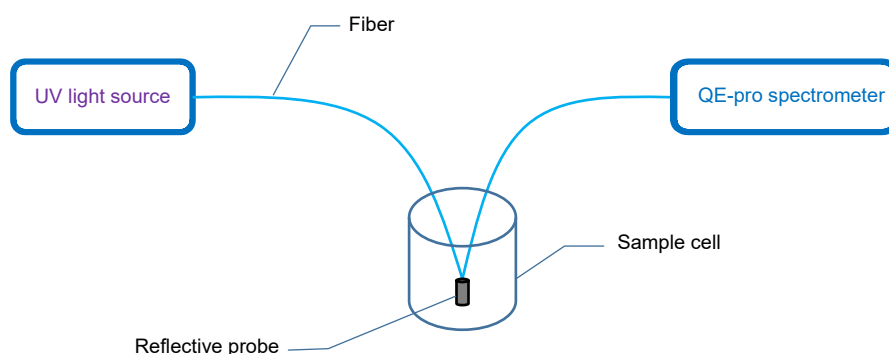


图 5 实验装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the experimental device

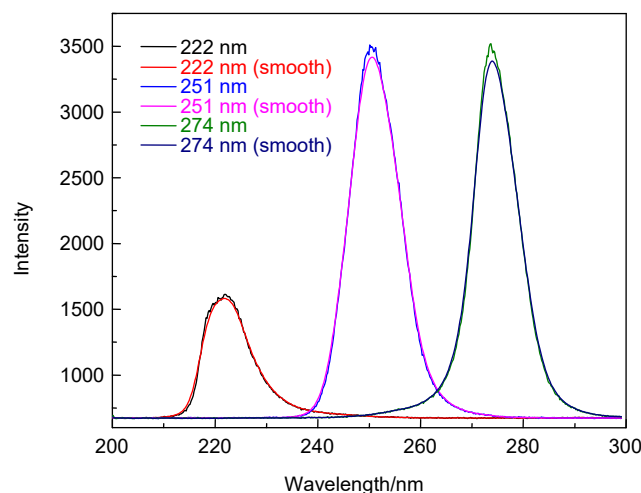


图 6 不同中心波长滤光片的原始数据和平滑后的数据

Fig. 6 Original and smoothed spectral data of filters with different central wavelengths

$$\lambda = \lambda_0 \sqrt{1 - \left(\frac{n}{N} \sin \left(\pi \left(\frac{d - D_0}{180} \right) \right) \right)^2}, \quad (12)$$

其中： λ_0 是拟合的中心波长值， d 是角度旋转台的旋转角度， D_0 是旋转角度的补偿角。以中心波长为 220 nm 的滤光片为例，在不同的旋转台角度下，将采集到的光强值进行平滑和峰值计算，得到每个滤光片不同角度下透过的中心波长值，并基于式(12)进行拟合，测量和拟合的结果如图 7 所示。从图中可以看出，原始的中心波长值(图中蓝色点)随旋转角度的变化趋势与式(12)相似，即随着角度的增加，中心波长值减小。但是原始数据的中心波长有较大波动，因此，还需要对原始数据进行平滑，才能获得明显变化趋势的曲线。从平滑后的数据(图中红色点)来看，中心波长值变化的灵敏度随角度的增加而增加。在旋转角大于 15°时，中心波长值才发生明显的变化，这主要是由于在入射角度较小时，由于光谱仪自身分辨率的限制而无法检测出由入射角的小角度变化导致的出射中心波长变

化。当旋转台角度变化为 5°~30°时，中心波长可调谐范围为 212 nm~222 nm。

表 1 显示了不同中心波长滤光片对应式(12)中的拟合参数及误差。由表 1 可以看出，每个滤光片标定的中心波长(λ_0)与实际中心波长之间具有一定误差，标定误差都小于 1%。这是由于在数据处理过程中先对原始数据进行平滑，再进行中心波长的选择，从而导致中心波长产生一定偏移。因此，需要对系统中的每个滤光片重新做标定，测量以标定值作为标准。每个滤光片的入射补偿角(D_0)不同且都不为 0，滤光片在初始的装载位置与入射光并不是垂直的位置关系。

图 8 对比了宽光谱光源的光强与经过不同滤光片后对应的窄带光源的光强。从图中可以看出，经过不同深紫外滤光片后，光源的光强明显减小，说明滤光片对紫外光的衰减很大；同时，经过滤光片的出射光半峰宽也明显减小，从而实现了不同中心波长的窄带光出射。

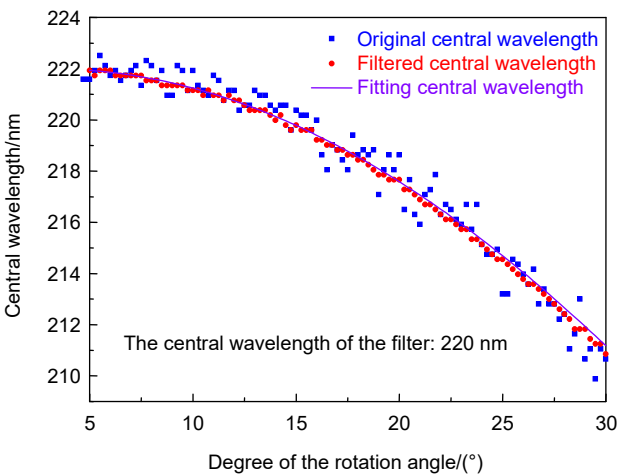


图 7 220 nm 的滤光片中心波长与旋转角度的关系

Fig. 7 Relationship between the central wavelength and the rotation angle

表 1 不同紫外滤光片基于式(12)计算的拟合参数

Table 1 Fitting parameters of the equation (12) of different UV filters

Filter	220 nm	228 nm	239 nm	250 nm	260 nm	270 nm	280 nm
λ_0	221.99	229.78	240.45	251.25	261.83	270.89	279.70
n/N	0.6808	0.7302	0.7548	0.6590	0.7662	0.7564	0.7809
D_0	3.0762	5.9561	6.5074	4.3775	8.0196	6.4473	6.6042
Central wavelength calibration error/%	0.904	0.781	0.607	0.500	0.704	0.330	0.107

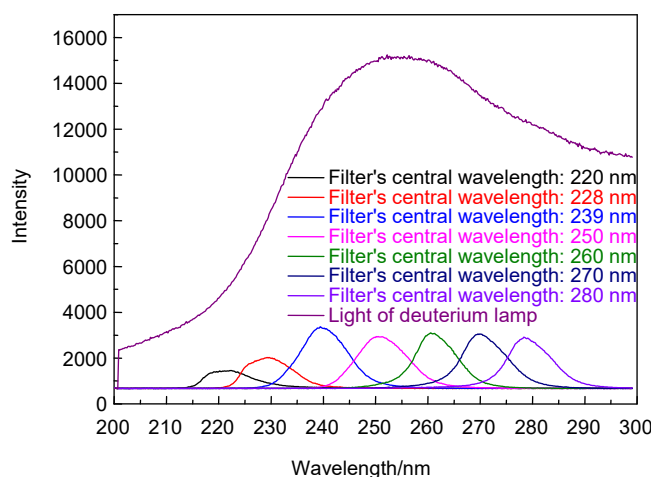


图8 宽光谱光源与窄带光源的光强对比

Fig. 8 Comparison of the broadband light source and narrowband light source

4.4 海水样品吸光度分析

为了验证窄带光源的可行性和准确性, 本文分别利用宽带光源和设计的中心波长可调谐窄带光源测量了含有不同硝酸盐含量的西太平洋海水样本的吸光度, 测量结果如图9所示。图9(a)是基于宽光谱光源

测量时计算得到的海水样品吸光度值, 图9(b)是基于窄带光源模块测量计算得到的样品吸光度值, 图9(c)是两种光源模块测量得到的吸光度的差值。从图中可以看出, 图9(a)和9(b)中含有不同浓度硝酸盐海水的吸光度光谱趋势基本一致, 且基于窄带光源模块计算

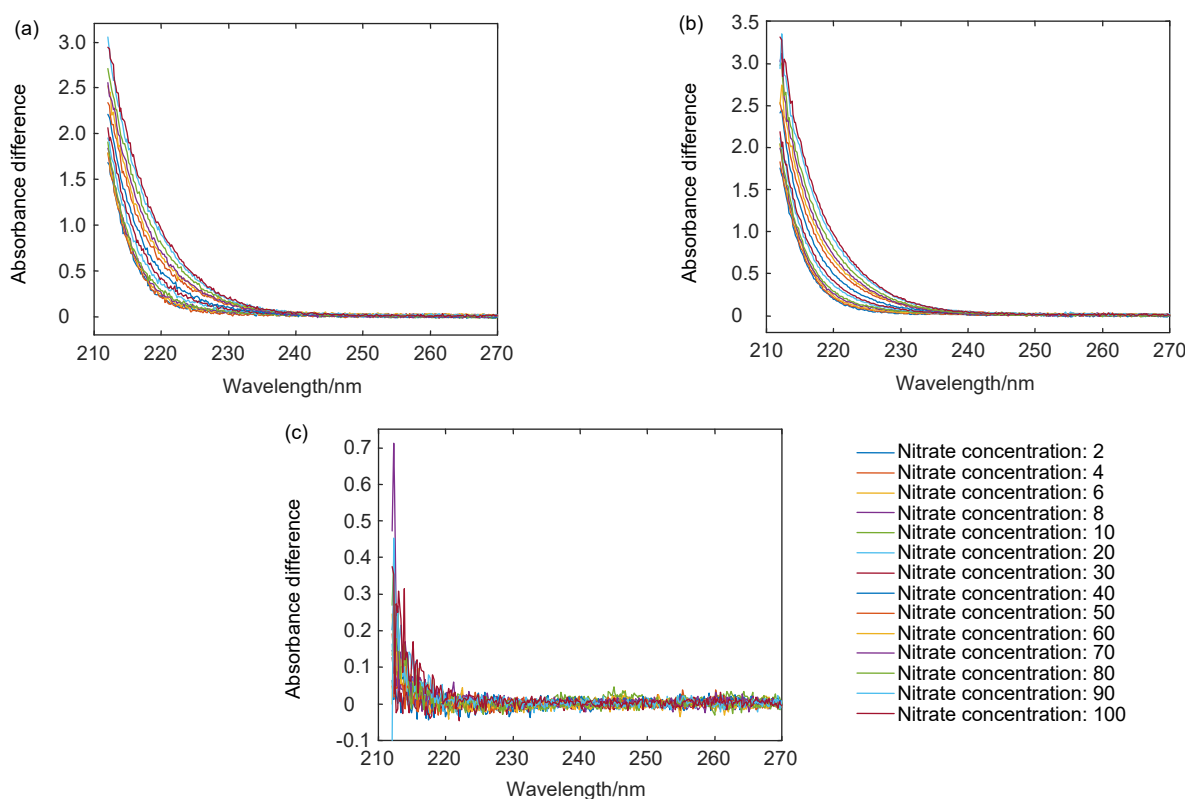


图9 西太平洋海水样品的吸光度光谱。

(a) 宽光谱光源测量结果; (b) 窄带光源模块测量结果; (c) 两种光源模块测量结果的差值。

Fig. 9 The absorbance of West Pacific seawater samples.

(a) Broadband light source; (b) Narrowband light source; (c) Difference between the two light sources

得到的吸光度曲线噪声更小, 光谱曲线更平滑, 光谱曲线之间的区分度更高, 有利于通过后续的预测算法获得硝酸盐的浓度。从图 9(c)中可以看出, 基于窄带紫外光源系统计算得到的吸光度比基于宽带紫外光源系统计算得到的吸光大, 尤其当波长小于 215 nm 时, 两者吸光度光谱的差值大于 0.1, 且吸光度差值随着波长的减小而增大。这是因为当中心波长 220 nm 的滤光片转动角度大于 20°时, 不仅中心波长会减小, 透过滤光片的光强也会随之减小, 导致信噪比减小, 光谱出现更多毛刺, 随机误差变大。同时, 本文对窄带光源的测量数据进行了滑动平均法滤波, 对原数据有平滑的作用, 但也会使得每个波长下的原始数据发生变化, 从而引入计算误差。综上分析, 在后续应用中, 基于窄带紫外光源的系统可从 215 nm 之后进行测量, 以减小测量误差。

5 结 论

本文基于平板多光束干涉理论和朗伯-比尔定律, 提出了一种中心波长可调谐的深紫外窄带光源设计方法, 针对硝酸盐测量系统进行了实验验证, 并同宽带光源进行了比对测试。通过拟合每个滤光片的入射角与中心波长之间的关系, 确定了可调谐窄带光源的参数。实验结果表明, 设计的紫外窄带光源中心波长可调谐范围为 212 nm~280 nm, 出射光具有较好的单色性。将宽光谱光源和窄带光源模块测量所得的西太海水样品吸光度进行比较后, 窄带光源模块测量所得的吸光度光谱数据更平滑, 且更有区分度, 从而证明了窄带光源模块的可行性, 也为硝酸盐测量系统的优化和改进提供了一种新的方法。

参考文献

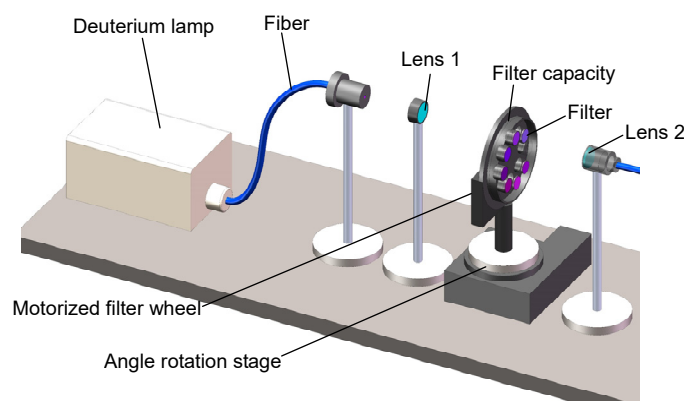
- [1] Wang X J, Hu B L, Yu T, *et al.* Analysis of nitrate in seawater of wheat island based on LLE-BPNN[J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2019, **39**(5): 1503–1508.
王雪霁, 胡炳樑, 于涛, 等. 基于 LLE-BPNN 的小麦岛海水硝酸盐含量分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, **39**(5): 1503–1508.
- [2] Pan J, Yu F, Ren Q, *et al.* Reliability analysis of spatial and temporal nitrate variations estimated by SUNA in the South Yellow Sea[J]. *Mar Sci*, 2017, **41**(12): 9–16.
潘俊, 于非, 任强, 等. 基于光学传感器在南黄海硝酸盐调查中的使用初探[J]. *海洋科学*, 2017, **41**(12): 9–16.
- [3] Ogura N, Hanya T. Nature of ultra-violet absorption of sea water[J]. *Nature*, 1966, **212**(5063): 758.
- [4] Zhu X Y, Yu K X, Zhu X F, *et al.* An improved algorithm for measuring nitrate concentrations in seawater based on deep-ultraviolet spectrophotometry: a case study of the Aoshan bay seawater and western pacific seawater[J]. *Sensors*, 2021, **21**(3): 965.
- [5] Ye J L, Wu Y H, Su Q F, *et al.* The deviation of the Lambert-Beer law from determination of NO_3^- -N, NO_2^- -N in surface water by spectrophotometry[J]. *J Fujian Fish*, 2015, **37**(5): 396–391.
叶江雷, 吴云辉, 苏秋芳, 等. 光度法检测地表水中硝酸盐氮、亚硝酸盐氮对朗伯-比尔定律的偏离[J]. *福建水产*, 2015, **37**(5): 396–391.
- [6] Poornima D, Shanthi R, Ranith R, *et al.* Application of *in-situ* sensors (SUNA and thermal logger) in fine tuning the nitrate model of the Bay of Bengal[J]. *Remote Sens Appl: Soc Environ*, 2016, **4**: 9–17.
- [7] Snazelle T T. Results from laboratory and field testing of nitrate measuring spectrophotometers[R]. Reston, VA: U. S. Geological Survey, 2015: 1–15.
- [8] Sakamoto C M, Johnson K S, Coletti L J. Improved algorithm for the computation of nitrate concentrations in seawater using an *in situ* ultraviolet spectrophotometer[J]. *Limnol Oceanogr: Methods*, 2009, **7**(1): 132–143.
- [9] Zielinski O, Voß D, Saworski B, *et al.* Computation of nitrate concentrations in turbid coastal waters using an *in situ* ultraviolet spectrophotometer[J]. *J Sea Res*, 2011, **65**(4): 456–460.
- [10] Zhu X F. Seawater nitrate measurement device based on deep ultraviolet wavelength adjustable light source[D]. Ji'nan: Shandong University, 2020.
朱笑凡. 基于深紫外波长可调光源的海水硝酸盐测量装置[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [11] Shaw G A, Siegel A M, Model J, *et al.* Recent progress in short-range ultraviolet communication[J]. *Proc SPIE*, 2005, **5796**: 214–225.
- [12] 梁铨廷. 物理光学[M]. 4 版. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [13] Huang T C, Chen H X, Li H F, *et al.* A research on tunable liquid crystal Fabry-Perot filter[J]. *Acta Photonica Sin*, 2003, **32**(12): 1438–1441.
黄腾超, 陈海星, 李海峰, 等. 可调谐液晶法-珀滤光片的研究[J]. *光子学报*, 2003, **32**(12): 1438–1441.
- [14] Murali A, Kakarla H K, Priyadarshini G M A. Improved design debugging architecture using low power serial communication protocols for signal processing applications[J]. *Int J Speech Technol*, 2021, **24**(2): 291–302.
- [15] Yan X, Li S J, Wang X D. Design and implementation of flow controller of plant protection machine based on embedded Linux and Qt[J]. *Comput Meas Control*, 2019, **27**(10): 95–99.
闫啸, 李树江, 王向东. 基于嵌入式 Linux 与 Qt 的植保机流量控制器设计与实现[J]. *计算机测量与控制*, 2019, **27**(10): 95–99.
- [16] Nguyen C V, Le Quang T, Vu T N, *et al.* A non-contact infection screening system using medical radar and Linux-embedded FPGA: implementation and preliminary validation[J]. *Inform Med Unlocked*, 2019, **16**: 100225.

Design and experiment of a tunable narrow-passband deep UV light source

Yu Kaixiong^{1†}, Zhu Xingyue^{1†}, Wu Chi^{1,2*}

¹Institute of Marine Science and Technology, Shandong University, Qingdao, Shandong 266237, China;

²Aixsensor Co., Dezhou, Shandong 253000, China



Schematic diagram of the UV tunable light source module

Overview: Nitrate is the mainly form of existence of nitrogen in seawater and is related to the outbreak of red tides. The ultraviolet (UV) absorption spectroscopy based on Lambert Beer law is one of the major technologies of nitrate measurement. This technology has a high requirement for the monochromaticity of light source. However, the present commercial nitrate sensors, including SUNA, utilize the broadband light source, which may lead to measurement errors. Therefore, it is important to design a new UV tunable light source with monochromaticity for the nitrate measurement system. Currently, both UV Laser Diode (LD) and UV Light Emitting Diode (LED) are the widely used UV light sources, but they are not suitable for the long-term and in-situ nitrate measurement system due to the low power of these light sources. Deuterium lamp, as a kind of UV gas light source with high power and stability, is a good choice to obtain monochromatic lights with different filters. This paper proposes a new UV tunable light source module based on the principles of Fabry-Perrot interference and multiple-beam interference. This light source module could obtain continuously adjustable ultraviolet light by changing the angles between the incident light and the filters. The module consists of a deuterium lamp, horizontal and vertical rotating tables, UV optical filters with different central wavelengths, and collimating lens. The filters are placed in the horizontal rotating table which has the filter capacity. UV narrowband light with different central wavelengths could be obtained by changing the position of the vertical rotating table. The horizontal rotating table is utilized to change the angles between the incident light and filters. The UV tunable light source has 7 optical filters with central wavelengths of 220 nm, 230 nm, 240 nm, 250 nm, 260 nm, 270 nm and 280 nm respectively. The experiment results demonstrate that with the rotation angle from 0 to 30°, each filter can realize wavelength tuning range of 10 nm, and the designed deep UV tunable light source module can obtain monochromatic light with the wavelength ranging from 212 nm to 280 nm. With the presented new light source module and the data processing method, the absorbance spectrum is smoother and more distinguishable than those with broadband light source. This paper proposes a reliable method to realize the UV tunable light source module for the nitrate measurement system and verifies the feasibility of this system. This work can provide the integration and optimization of the nitrate sensor with technical supports.

Yu K X, Zhu X Y, Wu C. Design and experiment of a tunable narrow-passband deep UV light source[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(8): 210173; DOI: 10.12086/oe.2021.210173

Foundation item: State Key Research and Development Project of China (2019YFC1408600), China Postdoctoral Science Foundation (2019M662365), Shandong Provincial Natural Science Foundation (ZR2020QD086), Key Technology Research and Development Program of Shandong (2019JZZY020711, 2018YFJH0702), Key Research Project of New and Old Kinetic Energy Conversion of Shandong Province (S190401010001), and Qingdao Postdoctoral Applied Research Project

* E-mail: qi.wu@sdu.edu.cn