

海水中不同盐分水溶液对光的透射特性研究

翟聪聪 韩雪云 彭玉峰 张毅 赵馨艺

河南师范大学物理与电子工程学院, 河南 新乡 453007

摘要 海水是一个复杂的多组分体系,其包含各种有机的、无机的、溶解的和悬浮的物质。海水中溶解物质的主要成分是无机盐,如NaCl、MgCl₂、KCl、NaHCO₃和MgSO₄等,这些成分对水下激光传输质量产生很大的影响。为了进一步了解海水的光学特性,分别测量了NaCl、MgCl₂、KCl、NaHCO₃和MgSO₄各自的水溶液在不同浓度时相应的透射率。实验通过用紫外-可见-红外分光光度计,分别测量各溶解物质水溶液的透射光谱。再利用波长为450、532、633 nm激光分别研究了各种盐分水溶液的光透射特性,对实验所得的数据进行一阶指数的曲线拟合,通过作图分析得出在所配备的溶液浓度范围内透射率随浓度减小而增大的结论。相同传输距离、不同浓度水溶液对光的透射特性影响不同,希望所研究的结果能对水下激光目标探测以及激光在海水中通信有一定的参考价值。

关键词 海洋光学; 激光; 无机盐; 透射率; 光谱

中图分类号 O433.5+1 文献标志码 A doi: 10.3788/LOP52.010101

Research on Light Transmission Characteristics of Some Inorganic Salts in Seawater

Zhai Congcong Han Xueyun Peng Yufeng Zhang Yi Zhao Xinyi

College of Physics and Electronic Engineering, Henan Normal University, Xinxiang, Henan 453007, China

Abstract Seawater is a complex system, which involves variety of organic, inorganic, dissolved and suspended substances. However, the main components in seawater are the inorganic salt, such as NaCl, MgCl₂, KCl, NaHCO₃, MgSO₄, and so on. These elements have a big influence on laser's transmission underwater. To further understand the optical properties of seawater, the transmittance in these salt waters with different concentrations of salt is measured. The transmission spectra of dissolved substance solution is measured by ultraviolet-visible-infrared spectrophotometer. The transmission characteristics of different salt waters are studied by using the wavelength of 450, 532, 633 nm lasers. Then a first-order exponential curve is gotten from experimental data, which shows the relationship between transmittance and the conductivity in different solute concentrations. From the figures, a conclusion that transmittance decreases with the increasing of concentration is gotten. With the same transmission distance and different concentrations, the attenuation characteristics of light are different. The work is hoped to be helpful for the research about underwater target detection and laser communication in the sea.

Key words oceanic optics; laser; inorganic salts; transmittance; spectroscopy

OCIS codes 010.1030; 010.4450

1 引言

随着高能激光技术的发展,激光水下通信、海底成像等领域研究引起国内外许多学者关注^[1-5]。一般而言,由于海水对光波的散射和吸收作用,光信号在水下的衰减比较大。自从Sullian和Dimtle研究光波在海洋中的传播特性时发现420~532 nm之间的蓝绿光存在海水的低损耗“窗口”后,围绕激光在水下通信技术的研究一直没有停止^[6-7]。

在海水中,溶解物质的主要成分是无机盐,如NaCl、MgCl₂、KCl、NaHCO₃和MgSO₄等。一些学者对海水中的溶解盐和悬浮粒子的相对光衰减特性进行了相关研究^[8-12]。Morel^[13-14]测量了最高质量浓度达100 g/L

收稿日期: 2014-07-18; 收到修改稿日期: 2014-08-07; 网络出版日期: 2014-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(61077037)

作者简介: 翟聪聪(1988—),女,硕士研究生,主要从事激光在海水中传输方面的研究。E-mail: sunflowerzcc@126.com

导师简介: 彭玉峰(1963—),男,博士,教授,主要从事光电技术方面的研究。E-mail: yufengp@sina.com(通信联系人)

的不同浓度 NaCl 溶液在 366 nm 和 546 nm 的散射;Ravisankar 等^[15]采用 split-pulse 激光方法测量了海水中的 NaCl、MgCl₂ 和 Na₂SO₄ 在波长范围 430 ~ 630 nm 对光学衰减特性的影响,通过对比自然海水和人工海水的衰减值发现,在波长范围 430 ~ 630 nm 内海水衰减值的变化与溶解物质的浓度没有太大关系,而与溶液中的悬浮物质有关;Pegau 等^[16]研究了不同盐度水溶液在可见光和近红外光的衰减特性;Gadani 等^[17]在研究盐度对水的介电性能的影响时发现:介电系数随盐度值的增加而减小;介电损耗随溶液盐度增加而增大;盐水的辐射系数随盐度的增加而减小等一系列的结论;最近,张晓东等^[18]推导出海盐对海水散射的热力学影响,发现散射随盐度增加而增加的非线性关系。

本文利用紫外-可见-红外分光光度计测量海水中不同溶质水溶液的透射率,扫描范围为 200~1500 nm,得到不同浓度水溶液的透射光谱,再利用波长为 450、532、633 nm 激光分别研究了不同盐分(实验所用的都是分析纯盐,含量都在 99.5%以上)水溶液的光透射特性,并且把测量结果进行作图处理,最后进行研究分析。本文主要研究目的是为了找出电导率与光透射率的关系,从而进行海水光学特性的分析,希望所做的工作能对相关研究有所帮助。

2 消光机理

海水光学特性容易变化主要是由溶解物质和悬浮体的易变性引起的。光信号在水体介质中能量衰减的原因有两个^[19]:

1) 光的吸收。定义单色准直光在海水介质中通过路程时,由吸收而引起辐射通量的损失为: $d\Phi = -a\Phi dr$,比例系数 a 为海水总的吸收系数^[20],单位为 m^{-1} 。海水的吸收系数

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_y(\lambda) + a_d(\lambda), \quad (1)$$

式中下标 w 、 ph 、 y 、 d 分别代表水分子、浮游植物/叶绿素、黄色物质和溶解物质对光的吸收作用。

2) 光的散射。定义单色准直光在海水介质中通过路程时,由散射而引起辐射通量的损失为: $d\Phi = -b\Phi dr$,其比例系数 b 为海水的总散射系数,单位为 m^{-1} 。海水的散射系数

$$b(\lambda) = b_w(\lambda) + b_{ph}(\lambda) + b_d(\lambda), \quad (2)$$

式中 $b_w(\lambda)$ 为水分子散射, $b_{ph}(\lambda)$ 为浮游植物散射, $b_d(\lambda)$ 为溶解物质散射。

总衰减系数为总吸收系数与总散射系数之和 $c = a + b$ 。

3 实验测量

3.1 溶液制备

为了减小实验误差,本实验所用溶液是由高浓度逐渐稀释至低浓度配制而成。先用干净量筒量取 1000 mL 蒸馏水(实验所用蒸馏水都是医用蒸馏水再重蒸馏四次后的蒸馏水)倒入准备好的干净烧杯里备用,用电子天平(仪器型号为 WT603CH,最大称量是 60 g,最小读数为 0.001 g)称取一定溶质倒入盛有蒸馏水的烧杯里,使溶液质量分数为 0.4%,待溶质充分溶解后取出 500 mL 溶液盛进准备好的容器中备用。然后在剩余的溶液中再注入 500 mL 蒸馏水,使溶液混合均匀,此时溶液的浓度为开始的一半,取出 500 mL 装入第二个准备好的干净容器内。同样的方法不断稀释溶液,直到溶液质量分数为 0.025%,此时的溶液浓度已经足够小不再继续稀释。实验所用的各种溶液都是用同样的方法配制而成。

3.2 测量方法

测定溶液透射光谱实验所用的设备名称为紫外-可见-红外分光光度计,型式名(品名):UV-3600 230VCE,实验扫描速度为高速,扫描范围为 200~1500 nm,扫描间隔为 5.0 nm。实验所用溶液盛放在一个长为 10 cm,底面直径为 1.8 cm 的圆筒比色皿中进行扫描。每种溶液测量完以后必须要用蒸馏水把比色皿清洗干净,以防溶液受到其他溶质的污染,从而影响实验结果。

为了验证扫描光谱的准确性,在可见光范围内抽取 3 个波长(分别为 450、532、633 nm)对各种溶质不同浓度水溶液进行测量得到其对应的透射率。本实验装置如图 1 所示,其中应用的激光器分别有:532 nm 波长的绿色激光器、450 nm 波长的蓝色激光器和 633 nm 波长的红色激光器。准直仪用来让激光在水平方向上传输。玻璃管道长度为 100 cm,容积约 300 mL,前后壁用厚度为 2 mm 的石英玻璃。功率计使用的是日

本 Sanwa 公司生产的 Laser power Meter LP1 功率计, 最小测量值为 $0.01 \mu\text{W}$, 测量范围为 $0.01 \mu\text{W} \sim 40 \text{mW}$ 。

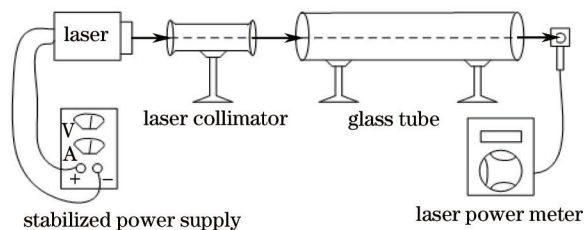


图1 测定溶液透射率的实验装置

Fig.1 Test device for measuring transmittance

由于传输通道的前后两层石英玻璃的反射和吸收会对激光的能量有所损耗, 因此实验首先标定激光穿透空管后的透射率(经测量为 0.8418), 并以此为基准值, 然后将不同激光在不同样本溶液传输后的透射率测试值与基准值的比值作为激光在溶液中传输的透射率。本实验每个数据都由测量五次并剔除不正常值后取平均所得。

4 测量结果与分析

4.1 不同波长的衰减特性

取各溶质 NaCl、MgCl₂、KCl、NaHCO₃ 和 MgSO₄ 的不同浓度溶液适量, 采用 UV-3600 230VCE 紫外-可见-红外分光光度计, 分别测量其衰减, 得到图 2 的曲线。

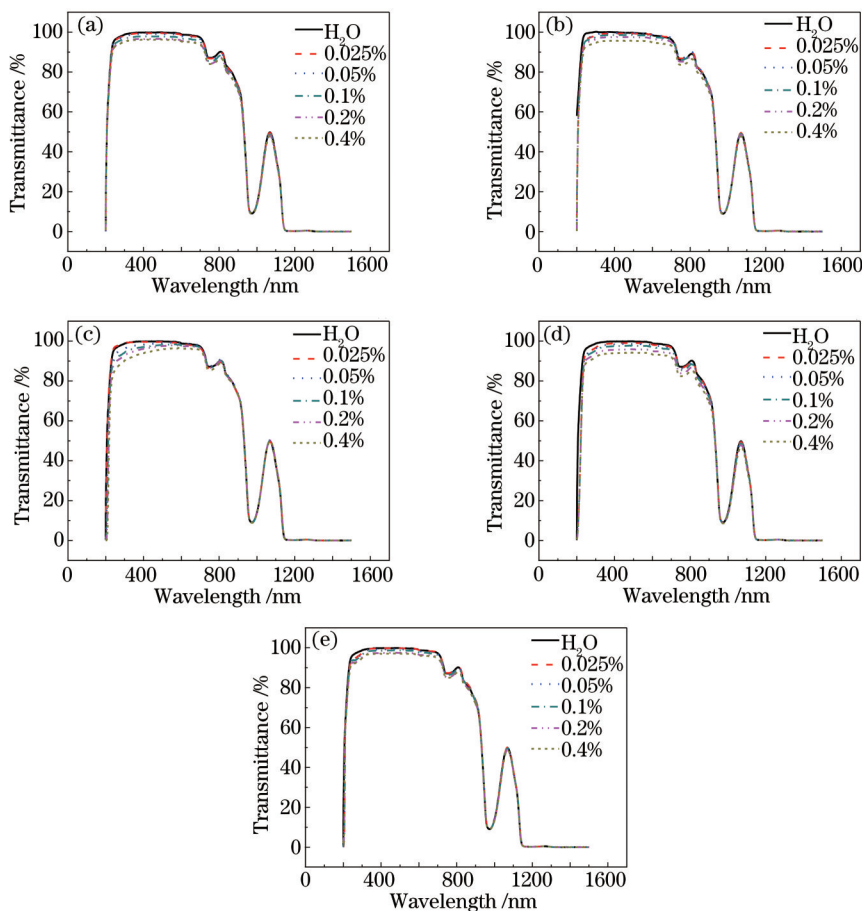


图2 不同浓度的(a) NaCl溶液、(b) MgCl₂溶液、(c) KCl溶液、(d) NaHCO₃溶液、(e) MgSO₄溶液的透射光谱

Fig.2 Transmission spectra of different concentrations of (a) NaCl solution, (b) MgCl₂ solution, (c) KCl solution, (d) NaHCO₃ solution, (e) MgSO₄ solution

从图2中可以发现各溶质的不同浓度溶液其透射率不同, 但是透射曲线形状大致相同, 而且最大透射率

的波长范围并没有改变,最大透射率的范围主要集中在420~530 nm;且可以发现在可见光范围内,各溶质的水溶液随着浓度的减小其透射率逐渐增大。出现该结果是因为,水分子散射向可见光谱中的短波方向增强,导致光在传播过程中向可见光谱中的短波方向衰减地明显,在实验结果中也得到了很好的验证。

4.2 透射率与溶液浓度的关系

为了分析透射率与溶液浓度的关系,把3个不同波长激光通过不同浓度的不同化学成分溶液之后的透射率用origin软件进行描点画图,再进行曲线拟合。经过分析后得到各种溶液(即NaCl、MgCl₂、KCl、NaHCO₃、MgSO₄溶液)的浓度与其对应的透射率之间的关系,如图3所示。本实验所用溶液是由高浓度逐渐稀释至低浓度配制而成,实验所用到的溶液质量分数依次是0.4%、0.2%、0.1%、0.05%、0.025%,图中横轴为各种溶液测量的浓度,用 x 来表示(单位 10^{-3})。纵轴为透射率 T 。以下为450,532,633 nm 3个波长激光通过不同浓度的不同化学成分溶液的透射率点图和拟合曲线。拟合函数方程为: $T = \exp(a + bx + cx^2)$ 。

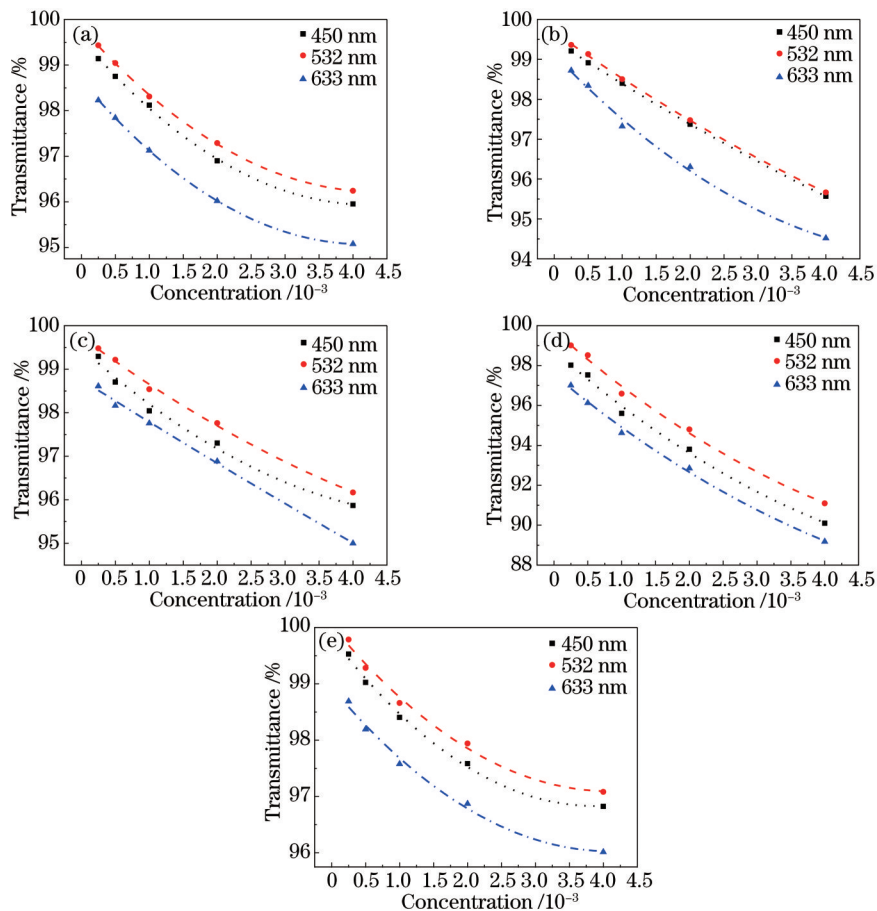


图3 (a) NaCl溶液、(b) MgCl₂溶液、(c) KCl溶液、(d) NaHCO₃溶液和(e) MgSO₄溶液的透射率与溶液浓度的关系

Fig.3 (a) Relationship between transmittances and concentrations of (a) NaCl, (b) MgCl₂, (c) KCl, (d) NaHCO₃ and (e) MgSO₄ solutions

以下为3个波长激光对应的各成分的透射率的一阶指数拟合曲线方程的参数。此表中的系数可供以后研究海水衰减系数作参考。

如图3可知,这些溶液的透射率与溶液浓度有关,曲线上呈现的规律为:在所配备的溶液浓度范围内透射率随浓度的减小而增大。这与上述透射光谱曲线所得结论基本相符。

以上现象,可能是受下列因素影响:电导率表示在给定条件下每1 cm³电解质溶液的导电能力,实验所配备的溶液大多以离子的形式出现,溶液由高浓度慢慢稀释至低浓度,当溶液浓度由高浓度慢慢稀释时,因溶液单位体积中的带电体减少,激光通过溶液时受带电体的影响变小,衰减减小,所以透射率随溶液浓度减小而增大。该结果也符合比尔-郎伯定律,表明实验结果的可靠性。

表1 三种波长激光通过各种化学成分溶液的透射率的拟合曲线参数

Table 1 Curve fitting parameters of the laser transmittance by various chemical components of the solution

Wavelength	Coefficient	NaCl	MgCl ₂	KCl	NaHCO ₃	MgSO ₄
450 nm	<i>a</i>	4.60343	4.60197	4.60002	4.59275	4.60339
	<i>b</i>	-0.01686	-0.01216	-0.01431	-0.03067	-0.0157
	<i>c</i>	0.00193	0.000469741	0.00128	0.00195	0.00202
532 nm	<i>a</i>	4.60101	4.59995	4.60258	4.60274	4.60552
	<i>b</i>	-0.01761	-0.01134	-0.01161	-0.03035	-0.01458
	<i>c</i>	0.00208	0.000327357	0.000627634	0.00193	0.00178
633 nm	<i>a</i>	4.59169	4.59639	4.59267	4.5803	4.59446
	<i>b</i>	-0.01786	-0.01807	-0.00995	-0.02912	-0.01452
	<i>c</i>	0.00215	0.00155	0.000067594	0.0017	0.00177

4 结 论

实验测定了NaCl、MgCl₂、KCl、NaHCO₃和MgSO₄的不同浓度水溶液的光衰减特性,通过对数据分析得出:这些溶液的透射率与浓度有关,曲线上呈现的规律为:在所配制的溶液浓度范围内透射率随浓度减小而增大,同浓度不同溶液的透射率也不同,但是透射曲线形状大致相同,而且最大透射率的波长范围并没有改变,最大透射率的范围主要集中在420~530 nm。

参 考 文 献

- Liu Yucui, Tang Chunming. Suppressing methods for oblique stripe noise in the image of marine microorganism[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0809001.
刘玉翠, 汤春明. 海洋生物全息图斜条纹噪声的抑制[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0809001.
- Wu Fangping, Zhang Xi, Li Peijun, *et al.*. Monte Carlo simulation analysis of underwater target detection by oceanic lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(12): 121401.
吴方平, 章曦, 李配军, 等. 海洋激光雷达水下目标探测的蒙特卡罗仿真分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(12): 121401.
- Wang Lei, Xu Zhiyong, Zhang Qiheng, *et al.*. Design and experiment of range-gated underwater laser imaging system [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(5): 051101.
王磊, 徐智勇, 张启衡, 等. 距离选通水下激光成像系统设计及实验[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(5): 051101.
- Dahe Liu, Jianfeng Xu, Rongsheng Li, *et al.*. Measurements of sound speed in the water by Brillouin scattering using pulsed Nd:YAG laser[J]. *Opt Commun*, 2002, 203(3-6): 335-340.
- A S Joshi, S S Deshpande, M L Kurtadikar. Dielectric properties of north Indian ocean seawater at 5 GHz[J]. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 2012, 1(6): 220.
- A K Sharma, D S Ahlawat, D Mohan, *et al.*. Concentration-dependent energy transfer studies in ternary dye mixture of Stilbene-420, Coumarin-540 and Nile Blue[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2009, 71(5): 1631-1633.
- M Kailasnath, P R John, P Radhakrishnan, *et al.*. A comparative study of energy transfer in dye mixtures in monomer and polymer matrices under pulsed laser excitation[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2008, 195(1): 135-143.
- P Wang, A Anderko. Computation of dielectric constants of solvent mixtures and electrolyte solutions[J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2001, 186(1-2): 103-122.
- X Zhang, L Hu, M S Twardowski, *et al.*. Scattering by solutions of major sea salts[J]. *Opt Express*, 2009, 17(22): 19580-19585.
- V I Man'kovsky. Spectral contributions of the components of seawater to the beam attenuation coefficient in surface waters of the Mediterranean Sea[J]. *Physical Oceanography*, 2012, 21(5): 305-319.
- Zhang Xi, Li Peijun, Wu Fangping, *et al.*. Influence of wavysea surface on laser detection of underwater target with Monte Carlo method[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(7): 0702003.

- 章 曦, 李配军, 吴方平, 等. 基于蒙特卡罗方法的波动水面对激光水下目标探测的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0702003.
- 12 Han Hongwei, Zhang Xiaohui, Ge Weilong. Study of the mode and maximum detecting performance of underwater laser range-gated imaging system[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(1): 0109001.
- 韩宏伟, 张晓晖, 葛卫龙. 水下激光距离选通成像系统的模型与极限探测性能研究[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0109001.
- 13 A Morel. Etude Experimentale de la diffusion de la lumiere par l'eau, les solutions de chlorure de sodium et l'eau de mer optiquement pures[J]. Chim Phys, 1966, 10: 1359-1366.
- 14 A Morel. Note au sujet des constantes de diffusion de la lumiere pour l'eau et l'eau de mer optiquement pures[J]. Cah Oceanogr, 1968, 20: 157-162.
- 15 M Ravisankar, A T Reghunath, K Sathianandan, *et al.*. Effect of dissolved NaCl, MgCl₂, and Na₂SO₄ in seawater on the optical attenuation in the region from 430 nm to 630 nm[J]. Appl Opt, 1988, 27(18): 3887-3894.
- 16 W S Pegau, D Gray, J R V Zaneveld. Absorption and attenuation of visible and near-infrared light in water: Dependence on temperature and salinity[J]. Appl Opt, 1997, 36(24): 6035-6046.
- 17 D H Gadani, V A Rana, S P Bhatnagar, *et al.*. Effect of salinity on the dielectric properties of water[J]. Indian Journal of Pure and Applied Physics, 2012, 50(6): 405-410.
- 18 X Zhang, L Hu. Scattering by pure seawater at high salinity[J]. Opt Express, 2009, 17(15): 12685-12691.
- 19 B X Du. The Principle of Semiconductor Laser[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2004. 79-93.
- 20 R N Dubinsky. Lidar moves toward the 21st century[J]. Lasers & Optronics, 1988, 7(4): 92-106.