

激光波长对拉曼散射水温遥感系统测温精度及探测深度的影响*

任秀云 田兆硕 孙兰君 付石友†

(哈尔滨工业大学(威海)信息光电子研究所, 威海 264209)

(2014年3月31日收到; 2014年4月5日收到修改稿)

机载激光拉曼散射雷达技术可以快速获取次表层海水温度的三维分布, 具有重要的实用价值和经济价值. 首先, 从理论上分析了水的伸缩振动拉曼谱峰值位置和半高全宽与激发波长之间的对应关系, 发现随着激发波长的增大, 拉曼峰逐渐向长波方向移动, 且拉曼光谱半高全宽显著增大. 然后, 实验测量了不同温度下 450 nm 激光和 532 nm 激光激发的水的拉曼光谱, 对比验证了上述理论分析结果. 并采用单高斯峰拟合法分析了两组拉曼光谱, 拟合出高斯峰峰值位置与温度之间的关系, 分析了激发波长对温度测量精度的影响. 研究发现, 采用较长波长的激发光可以提高拉曼光谱的测量精度, 从而改善测温精度. 最后, 建立了拉曼散射雷达方程, 分析了拉曼散射系数与激光波长之间的关系, 研究了激光波长对雷达系统探测深度的影响. 结果表明, 激光波长对雷达系统探测深度有很大的影响, 采用 480 nm 以下波长的激光时雷达系统探测深度较大, 而采用长波段激光时雷达系统探测深度会大幅降低. 实际系统设计中选取激光光源时需要综合考虑上述两方面的影响.

关键词: 海水温度, 拉曼散射, 测温精度, 探测深度

PACS: 42.68.Wt, 42.68.Xy, 42.62.Fi, 92.05.Hj

DOI: 10.7498/aps.63.164209

1 引言

次表层海水温度测量对研究海洋环境和气候监测及自然灾害的早期预报等十分重要, 是目前热门的研究课题之一. 利用船载仪器、浮标和定点站位测量海水温度存在测量速度慢、覆盖面小、同步性差等缺点. 以微波辐射或红外辐射为测量介质的星载遥感测温技术虽然可以实现大范围快速测量, 却只能测量表层海水的温度. 利用蓝绿激光在海水较好的透射性, 机载激光拉曼散射雷达技术可以快速获取次表层海水温度的三维分布, 具有重要的应用价值和经济价值.

相邻水分子的氧原子之间均存在氢原子形成的氢键^[1], 其平均配位数为 4.4, 说明水中还有不与

相邻水分子形成氢键的单个水分子存在. 由氢键构成的水分子簇团不断地生成和消失, 随着温度的升高, 四面体结构簇团的浓度减少, 单个水分子增多. 而多分子与单分子的 O—H 键拉曼频移是不同的, 通过测量海水的拉曼光谱可测量水中多分子与单分子的浓度关系, 从而得到海水温度值.

应用拉曼散射遥感测量海水温度的思想始于 20 世纪 70 年代中期. Chang^[2] 率先在实验室研究了 40% 氯化钠水溶液的激光拉曼散射回波信号, 采用 460 nm 的染料激光器和两种波长的窄带滤光片及光子计数器搭建了遥感系统, 研究了两种波长回波信号强度比与温度的对应关系. 1979 年, Leonard 等^[3] 采用 337.1 nm 的脉冲氮分子激光器和分辨率为 0.25 nm 的光栅光谱仪进行了海上遥感实验, 测温精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$. 之后, Collins 等^[4] 采

* 国家自然科学基金(批准号: 41306092)、山东省自然科学基金(批准号: ZR2013DQ026)、山东省科技攻关计划(批准号: 2011GHY11514)和中央高等学校基本科研基金(批准号: HIT.NSRIF.2013139)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: fsytzs@126.com

用 460 nm 的脉冲染料激光器和光学多道分析仪在实验室内研究了蒸馏水的拉曼光谱与温度之间的关系, 其测温精度约为 $\pm 0.53\text{ }^\circ\text{C}$. Liu 等 [5,6] 分别采用 488 nm 的连续氩离子激光器和 532 nm 的 Nd:YAG 脉冲激光器及分辨率为 0.5 nm 的光栅光谱仪进行了实验室研究和现场测温实验, 对获得的拉曼光谱进行双高斯函数拟合处理, 其现场实验测温精度为 $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$. Cecchi 和 Raimondi [7] 采用 514.5 nm 的连续氩离子激光器和光学多道分析仪进行了现场测量. Becucci 等 [8] 采用 514.5 nm 的连续氩离子激光和 355 nm 的脉冲激光及光栅光谱仪对拉曼散射测温技术进行了研究.

水的拉曼光谱内部振动包括弯曲振动和伸缩振动 [9]. 由于水的弯曲振动强度很弱, 遥感海水温度技术都是基于水的伸缩振动拉曼光谱. 一般认为, 水分子的伸缩振动存在分子间和分子内两种振动模式, 分子间的氢键作用引起的振动峰频率较低, 分子内的 OH 振动峰频率较高; 含较少氢键的分子构型振动峰频率较高, 含较多氢键的分子构型振动峰频率较低 [10]. 当前的研究中通常将水的伸缩振动拉曼光谱分解为若干个高斯谱峰. 虽然对分解为 2 峰 [5,8]、3 峰 [7]、4 峰 [10,11] 还是 5 峰 [3] 的合理性至今尚未定论, 但毋庸置疑的是所有振动的耦合使得叠加在一起的伸缩振动拉曼光谱是一个具有较大谱宽、拉曼峰波长与激发光波长的频移为常数的光谱, 其频移约为 $3000\text{--}3800\text{ cm}^{-1}$. 显然, 不同波长的激光激发的拉曼光谱的谱峰波长不同, 谱宽也不相同, 因此激光光源的选择对拉曼光谱的分辨率具有很大影响, 从而影响海水温度的测量精度. 另外, 拉曼散射相当于一个吸收再发射的过程, 不同波长的激光激发时水的拉曼散射系数不同, 同时, 激发光及其激发产生的拉曼光在水中的衰减系数也不相同, 因此激光光源的选择对于拉曼散射水温遥感系统的探测深度也有很大影响.

本文首先从理论上分析了水伸缩振动拉曼谱峰位和半高全宽与激光波长之间的对应关系. 然后, 实验测量了不同温度下 450 nm 激光和 532 nm 激光激发的水的拉曼光谱, 对比验证了理论分析结果, 并采用单高斯峰拟合法分析了两组拉曼光谱, 拟合出高斯峰峰位与水温的关系, 分析了激光波长对水温测量精度的影响. 最后, 建立了拉曼散射雷达方程, 分析了拉曼散射系数和衰减系数与激光波长之间的对应关系, 研究了激光波长对雷达系统探测深度的影响.

2 激光波长对拉曼光谱特征及水温探测精度的影响

水的拉曼散射过程可以描述为波长为 λ_E 的光被水体吸收再发射出波长为 λ_R 的光的过程. 含有不同氢键数的分子内 OH 伸缩振动模和自由分子间的氢键作用引起的 OH 伸缩振动模是产生拉曼散射的主要原因. 所有振动模耦合叠加形成的伸缩振动拉曼光谱峰位与激光波长之间的频移约为 3400 cm^{-1} , 激光波长与伸缩振动拉曼光谱峰位之间的对应关系可由下式给出:

$$\frac{1.0 \times 10^7}{\lambda_E} - \frac{1.0 \times 10^7}{\lambda_R} = \Delta\nu. \quad (1)$$

这里, λ_E , λ_R , $\Delta\nu$ 的单位分别为 nm, nm, cm^{-1} .

将拉曼频移 $\Delta\nu = 3400\text{ cm}^{-1}$ 代入 (1) 式, 可以计算出不同波长激光所激发的伸缩振动拉曼光谱峰位, 结果如图 1 所示.

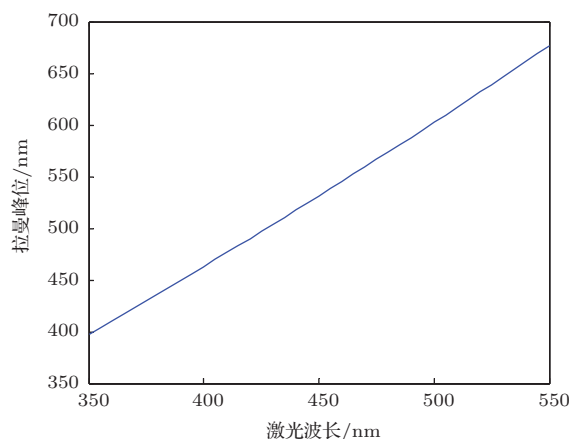


图 1 激光波长与水伸缩振动拉曼峰位的对应关系

David 和 Korenowski [12] 的研究结果表明, 水的伸缩振动模包括 3051, 3233, 3393, 3511, 3628 cm^{-1} 五条谱线. 类似地, Sun [13] 将水的伸缩振动拉曼谱分解为 3004, 3227, 3431, 3565, 3633 cm^{-1} 五条谱线. Haltrin 和 Kattawar [10] 将水的伸缩振动拉曼谱归纳为 3250, 3425, 3530, 3625 cm^{-1} 四个模再发射的过程, 并给出了其相应的拉曼散射重分配函数,

$$I_R = c(\lambda_E) \sum_{i=1}^4 a_i \times \exp \left[\frac{(10^7/\lambda_E - 10^7/\lambda_R - \Delta\nu_i)^2}{2\sigma_i^2} \right], \quad (2)$$

式中, I_R 是归一化拉曼光强; $c(\lambda_E)$ 是归一化常数, 与激光波长有关. a_i , $\Delta\nu_i$ 和 σ_i 的数值列于表 1.

表1 水的伸缩振动拉曼频率重分配参数

| i | a_i | $\Delta\nu_i$ | σ_i |
|-----|-------|---------------|------------|
| 1 | 0.41 | 3250 | 89.179 |
| 2 | 0.39 | 3425 | 74.317 |
| 3 | 0.10 | 3530 | 59.543 |
| 4 | 0.10 | 3625 | 59.453 |

将表1所列数值代入(2)式, 计算后可以获得任意波长激光激发的水伸缩振动拉曼光谱. 图2给出了532 nm激光激发的水拉曼光谱. 从图2可以看出, 532 nm激光激发的水伸缩振动拉曼光谱峰位于650 nm附近, 与图1所示的计算结果相符. 图3给出了水的拉曼光谱半高全宽与激光波长之间的对应关系. 显然, 随着激光波长的增大, 拉曼光谱半高全宽显著增大.

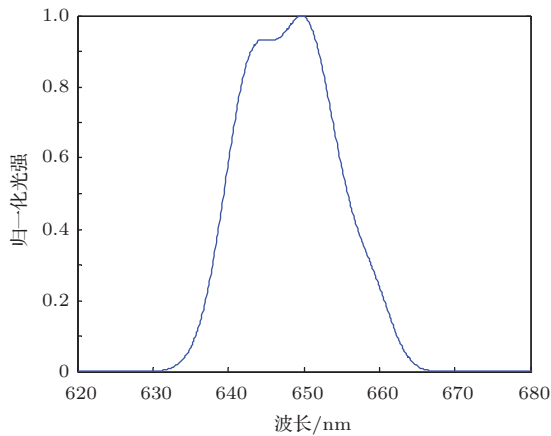


图2 532 nm激光激发的水伸缩振动拉曼光谱

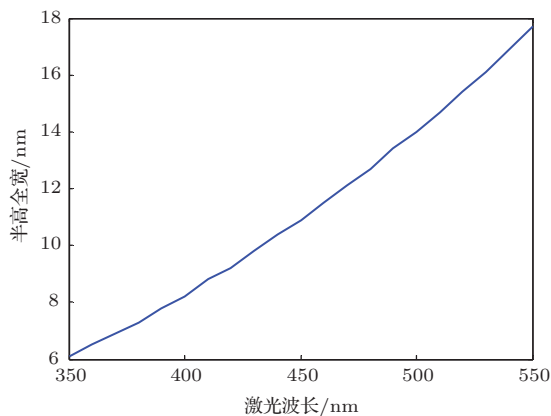


图3 水伸缩振动拉曼光谱半高全宽与激光波长的关系

为了与理论计算结果进行对照, 我们分别采用450 nm的半导体激光器和532 nm的倍频Nd:YAG激光器作为激光光源, 用分辨率为0.2 nm的光栅光谱仪测量了不同温度下水的伸

缩振动拉曼光谱. 图4给出了室温条件下经过多次测量平均、去本底和归一化后的水拉曼光谱. 图4(a)为450 nm激光激发的拉曼光谱, 其半高全宽约为12 nm, 与图3所示的理论计算结果基本相符. 图4(b)为532 nm激光激发的拉曼光谱, 其半高全宽约为18 nm, 与图3所示的理论计算结果也基本相符. 比较图4(a)和(b)可知, 532 nm激光激发的拉曼光谱明显宽于450 nm激光激发的拉曼光谱, 因此, 后者能够更好地反映拉曼光谱中不同振动模的权重. 很多用于近场微量试剂测量的专用拉曼光谱仪的光谱数据都以频移谱的形式给出, 测量结果一般用于物质结构的研究等, 实际上拉曼频移谱是由拉曼光谱依据(1)式进行换算得出. 图5给出了450 nm激光和532 nm激光激发的水伸缩振动拉曼频移谱, 其中虚线是450 nm激光激发的拉曼光谱, 实线是532 nm激光激发的拉曼光谱. 由图5可知, 两种波长的拉曼频移谱符合得很好, 但由于实际测量结果中两组拉曼光谱的谱宽不同, 因此转换所得的拉曼频移谱的分辨率不同. 若采用相同分辨率的光栅光谱仪进行分光, 激光波长越短, 测量得到的拉曼频移谱分辨率越低; 反之, 激光波长越长, 测量得到的拉曼频移谱分辨率越高.

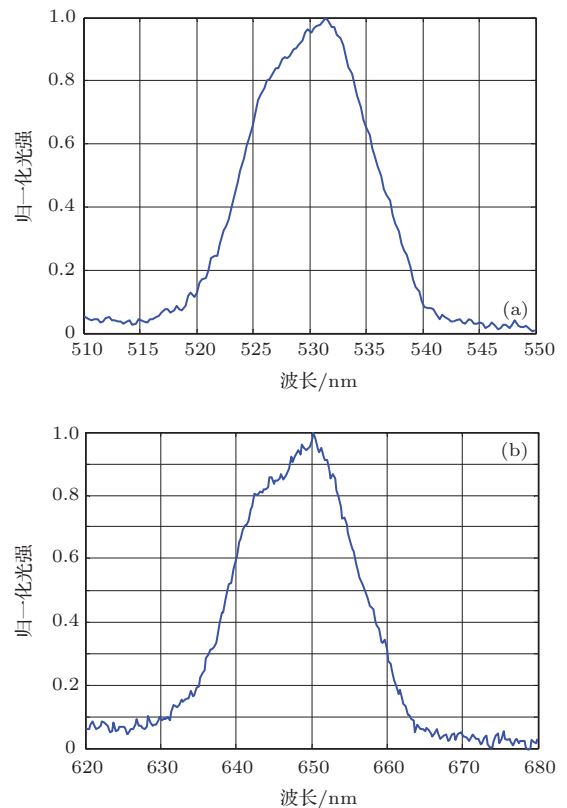


图4 室温下, 不同波长激光激发的水伸缩振动拉曼光谱 (a) 450 nm 激光; (b) 532 nm 激光

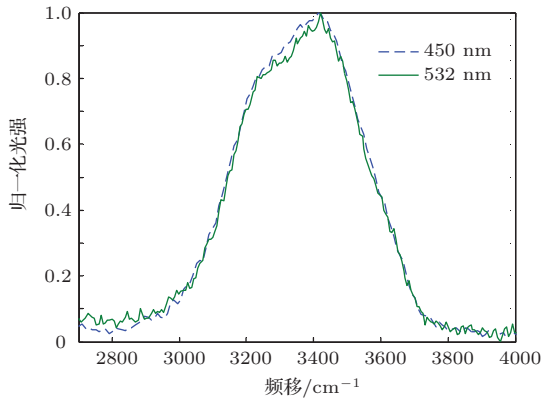


图5 不同波长激光激发的水伸缩振动拉曼频移谱

利用拉曼光谱分析提取海水温度信息可以采用双色法和函数拟合法, 其中函数拟合法精度较高, 且易于操作. 函数拟合法是将海水的拉曼光谱拟合为一个或几个适当的函数(如高斯函数), 使得其峰值位置、两个主要函数的面积或高度/宽度比等与海水温度有较直接的比例关系.

采用单高斯峰拟合法, 分别处理了不同温度下 450 nm 激光和 532 nm 激光激发的水伸缩振动拉曼光谱, 结果如图 6 所示, 发现高斯峰峰值位置与水温呈线性关系. 图 6 (a) 为 450 nm 激光激发的水拉曼光谱高斯峰峰位随水温的变化情况. 从图 6 (a) 可以看出, 在温度从 15 °C 逐渐升高到 46 °C 的过程中, 拉曼光谱拟合高斯峰峰位由 530.125 nm 逐渐向长波方向移动到 530.837 nm, 峰位的移动与温度的增加基本上呈线性关系, 线性拟合所得相关系数为 0.9862, 拟合结果为

$$P_{450} = 529.78008 + 0.02297T, \quad (3)$$

式中, P_{450} 是 450 nm 激光激发的水拉曼光谱的峰位, 单位为 nm; T 是水温, 单位为 °C. 图 6 (b) 为 532 nm 激光激发的水拉曼光谱高斯峰峰位随水温的变化情况. 从图 6 (b) 可以看出, 在温度从 20 °C 逐渐升高到到 47 °C 的过程中, 拉曼光谱拟合高斯峰的峰位由 647.941 nm 逐渐向长波方向移动到 648.961 nm, 峰位的移动与温度的增加也呈线性关系, 线性拟合所得相关系数为 0.9996, 拟合结果为

$$P_{532} = 647.18581 + 0.0378T, \quad (4)$$

式中 P_{532} 是 532 nm 激光激发的水拉曼光谱峰位, 单位为 nm. 比较 (3) 和 (4) 式可以发现, 前者的斜率明显小于后者的斜率. 根据误差理论可知, 即使在 P 具有相同的测量误差和拟合误差的条件下, 由 (4) 式计算出的温度误差 ΔT 较小.

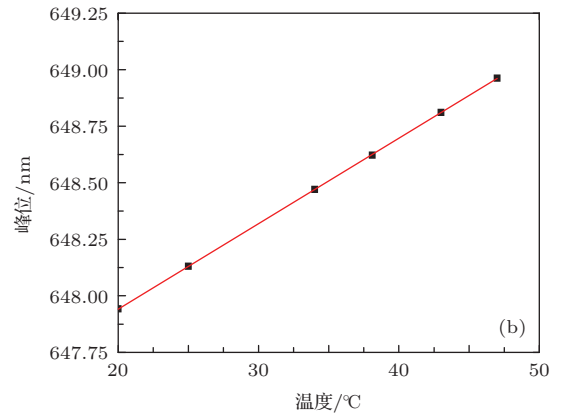
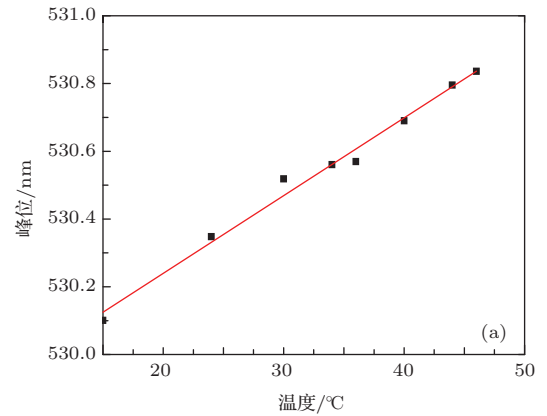


图6 不同波长激光激发的拉曼光谱单高斯峰拟合峰位与温度的关系 (a) 450 nm 激光; (b) 532 nm 激光

根据上述分析可知, 选用长波激光光源可以提高拉曼光谱测量精度, 从而改善测温精度, 前期研究中, Leonard 等 [3] 采用 337.1 nm 的脉冲氮分子激光器作为激发光源, 所测得的拉曼光谱宽度很窄, 不能充分反映不同振动模随温度的变化情况, 因此所获得的测温精度较低. Collins 等 [4] 采用 460 nm 的脉冲染料激光器作为激发光源, 提高了测温精度. Liu 等 [6] 采用 532 nm 的 Nd : YAG 脉冲激光器作为激发光源, 进一步提高了测温精度, 但由于选用的光栅光谱仪分辨率较低 (0.5 nm), 因此只获得了 ± 0.5 °C 的测温精度.

3 激光波长对雷达系统探测深度的影响

激光波长除了决定拉曼光谱的峰位和光谱宽度外, 还对拉曼光谱的信号强度具有很大影响. 一方面, 不同波长激光及其激发产生的拉曼光在水中的衰减系数不同; 另一方面, 不同波长激光激发水拉曼散射光的能力也不相同 [11,14]. 水的后向拉曼

散射系数 $\beta_R(\lambda_E)$ 可表示为

$$\beta_R(\lambda_E) = a_0^R(\lambda_0) \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_E} \right)^m, \quad (5)$$

式中, $\lambda_0 = 488 \text{ nm}$; $a_0^R(\lambda_0)$ 是 488 nm 激光激发时水的拉曼散射系数, $a_0^R(\lambda_0) = (2.7 \pm 0.2) \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$; $m = 5.5$. 根据 (5) 式可以计算出不同波长激光激发时水的拉曼散射系数, 结果如图 7 所示. 从图 7 可以看出, 随着激光波长的增大, 水的拉曼散射系数迅速降低. 蓝绿激光处于海水透射窗口, 在水中传输时其衰减系数较小. Austin 和 Petzold^[15] 在总结前人研究结果的基础上, 建立了不同波长激光在海水中传输时的衰减系数的计算模型,

$$K(\lambda) = M(\lambda)[K(490) - K_W(490)] + K_W(\lambda), \quad (6)$$

式中, $K(490)$ 是 490 nm 激光在海水中传输时的衰减系数, $K_W(490)$ 是 490 nm 激光在纯水中传输时的衰减系数, $M(\lambda)$ 是斜率函数, $K_W(\lambda)$ 是波长为 λ 的激光在纯水中传输时的衰减系数. 图 8 为根据 (6) 式计算得到的不同波长激光在海水中传输时的衰减系数, 其中, 实线对应 $K(490) = 0.12$ 的情况, 光衰减系数较大, 属于三类海水; 短划线对应 $K(490) = 0.08$ 的情况, 属于二类海水; 点划线对应 $K(490) = 0.04$ 的情况, 光衰减系数较小, 属于清洁的一类海水.

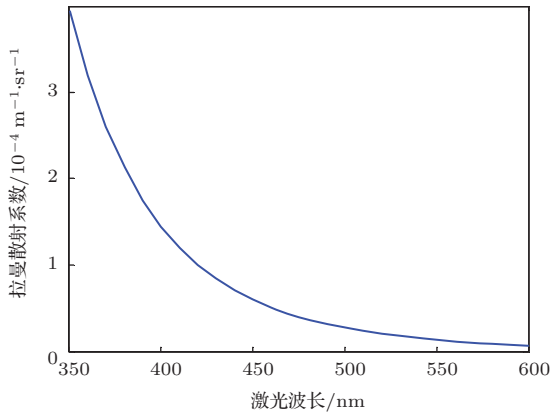


图 7 不同波长激光激发时水的拉曼散射系数

根据激光雷达的基本原理, 建立拉曼散射雷达方程. 雷达系统接收到的单脉冲拉曼散射光子数 N_R 可以表示为

$$N_R = N_0(\lambda_E)\beta_R(\lambda_E)\Delta z d\Omega \varepsilon_D \varepsilon_{OS} \tau_{aw}^2 \tau_{\lambda_E} \tau_{\lambda_R}. \quad (7)$$

这里, $N_0(\lambda_E)$ 是波长为 λ_E 的激发光单脉冲输出的光子数, $N_0(\lambda_E) = E\lambda_E/(hc)$, 其中, E 是激光器单脉冲能量, h 是普朗克常数, c 是真空中光速; Δz 是深度分辨单元, 对应激光脉冲在水中的传输距离, $\Delta z = c\Delta t/(2n)$, 其中, Δt 是激光脉冲宽度, n 是海水的折射率; $d\Omega$ 是系统的接收立体角, $d\Omega = \pi D^2/[4(z+H)^2]$, 其中, D 是接收透镜通光口径, H 是探测器距水面的高度, z 是探测位置深度; ε_D 是光电接收器的量子效率; ε_{OS} 是整个光学系统的传输效率; τ_{aw} 是光在空气与海水交界面的透过率; τ_{λ_E} 是激光在水下传输时的透过率, $\tau_{\lambda_E} = \exp(-K_{\lambda_E}z)$, 其中 K_{λ_E} 是激光在水下传输时的衰减系数; τ_{λ_R} 是拉曼散射光在水下传输时的透过率, $\tau_{\lambda_R} = \exp(-K_{\lambda_R}z)$, 其中 K_{λ_R} 是拉曼散射光在水下传输时的衰减系数.

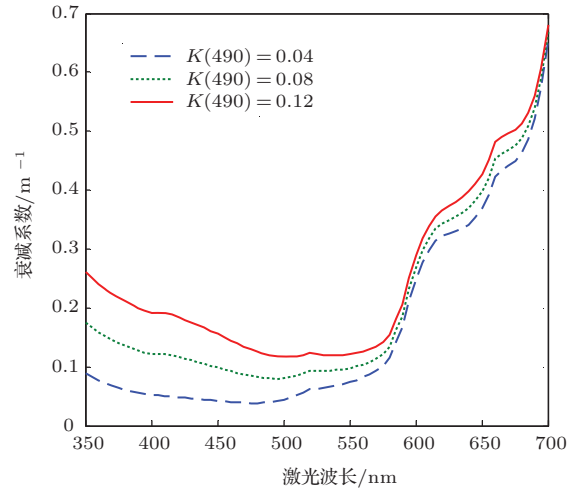


图 8 不同波长激光在海水中传输时的衰减系数

根据 (7) 式, 取 $E = 500 \text{ mJ}$, $h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$, $n = 1.33$, $\Delta t = 10 \text{ ns}$, $D = 400 \text{ mm}$, $H = 300 \text{ m}$, $\varepsilon_D = 0.13$, $\varepsilon_{OS} = 0.45$, $\tau_{aw} = 0.98$, 并结合 (5) 和 (6) 式, 可以计算出拉曼散射测温系统接收到的任意深度 z 处某一波长激光激发的拉曼散射光子数. 图 9 给出了当探测深度 $z = 20 \text{ m}$ 时光电探测器接收到的拉曼散射光子数与激光波长之间的关系, 其中, 图 9(a) 对应一类海水的情况, 图 9(b) 对应三类海水的情况. 从图 9 可以看出, 激光波长对于拉曼散射信号强度有很大影响, 相同探测深度情况下, 采用较短波段的激光激发获得的拉曼信号强度比较长波段的激光激发获得的拉曼信号强度高 3—5 个数量级.

雷达系统信噪比约为接收光子数的平方根. 取信噪比为 100, 即以接收光子数为 1.0×10^4 作为探测极限, 可以计算出雷达探测深度与激光波长

之间的关系, 结果如图 10 所示, 其中, 图 10(a) 对应一类海水的情况, 图 10(b) 对应三类海水的情况. 对比图 10(a) 和 (b) 可以发现: 海水质量对拉曼散射雷达系统探测深度的影响很大, 较清澈的一类海水中系统的探测能力远高于较浑浊的三类

海水中系统的探测能力; 对于一类海水区域, 选用 350—480 nm 波段的激光器作为激发光源都能获得较深的探测深度; 而对于三类海水区域, 短波段激光衰减较严重, 选用 400—480 nm 之间的激光可以获得最佳探测深度.

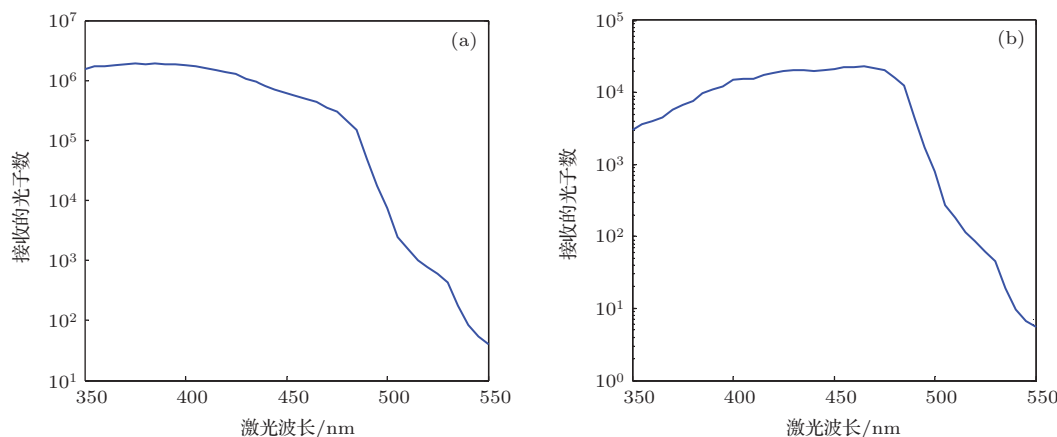


图 9 探测深度为 20 m 时接收到的拉曼散射光子数与激光波长的关系 (a) 一类海水情况; (b) 三类海水情况

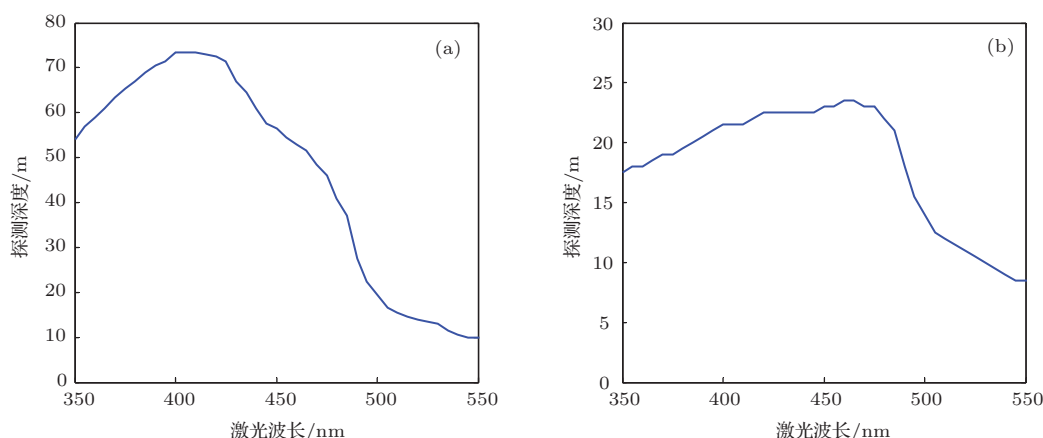


图 10 拉曼散射系统探测深度与激光波长的关系 (a) 一类海水情况; (b) 三类海水情况

4 结 论

本文首先从理论上分析了水伸缩振动拉曼光谱峰位和半高全宽与激光波长之间的对应关系, 发现随着激光波长的增大, 拉曼散射峰逐渐向长波方向移动, 且拉曼光谱半高全宽显著增大. 然后, 实验测量了不同温度下 450 nm 激光和 532 nm 激光激发的水伸缩振动拉曼光谱, 对比验证了上述理论分析结果, 并采用单高斯峰拟合法分析了两组拉曼光谱数据, 拟合出高斯峰峰值位置与水温的关系, 分析了激光波长对水温测量精度的影响, 发现采用较长波长的激光可以提高拉曼光谱测量精度, 从而改善测温精度. 最后, 建立了拉曼散射激

光雷达方程, 分析了水拉曼散射系数和衰减系数与激光波长之间的关系, 研究了激光波长对雷达系统探测深度的影响. 结果表明, 激光波长对雷达系统探测深度有很大的影响, 利用 480 nm 以下波段的激光作为激发光源时, 其探测能力较好, 采用长波段激光的雷达系统探测深度大幅降低. 实际系统设计中选取激光光源需要综合考虑上述两方面的影响, 若分光系统具有足够小的分辨率, 则宜采用 400—480 nm 波段的激光, 以提高系统探测深度; 若分光系统分辨率较大, 则宜采用较长波段的激光, 可以有效地提高光谱测量精度和温度测量精度, 此时应提高激光器峰值功率, 以获得较好的系统探测深度.

参考文献

- [1] Gu B, Zhang F S, Huang Y G, Fang X 2010 *Chin. Phys. B* **19** 036101
- [2] Chang C H 1976 *U.S. Patent* 3986775
- [3] Leonard D A, Caputo B, Hoge F E 1979 *Appl. Opt.* **18** 1732
- [4] Collins D J, Bell J A, Zanoni R, McDermid I S, Breckinridge J B, Sepulveda C A 1984 *Proc. SPIE* **489** 247
- [5] Liu Z S, Ma J, Zhang J L, Chen W Z 1991 *Proc. SPIE* **1558** 306
- [6] Liu Z S, Zhang J L, Chen W Z, Huang X S, Ma J 1992 *Proc. SPIE* **1633** 321
- [7] Cecchi G, Raimondi V 1995 *International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (Firenze: IEEE) p1741
- [8] Becucci M, Cavalieri S, Eramo R, Fini L, Materazzi M 1999 *Laser Phys.* **9** 422
- [9] Shi S P, Zhang Q, Zhang L, Wang R, Zhu Z H, Jiang G, Fu Y B 2011 *Chin. Phys. B* **20** 063102
- [10] Haltrin V I, Kattawar G W 1993 *Appl. Opt.* **32** 5356
- [11] Han D, Chen L F, Li X X, Tao J H, Su L, Zou M M, Fan M 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 109301 (in Chinese) [韩冬, 陈良富, 李莘莘, 陶金花, 苏林, 邹铭敏, 范萌 2013 物理学报 **62** 109301]
- [12] David M C, Korenowski G M 1998 *J. Chem. Phys.* **108** 2669
- [13] Sun Q 2009 *Vib. Spectrosc.* **51** 213
- [14] Bartlett J S, Voss K J, Sathyendranath S, Vodacek A 1998 *Appl. Opt.* **37** 3324
- [15] Austin R W, Petzold T J 1986 *Opt. Eng.* **25** 471

Effects of laser wavelength on both water temperature measurement precision and detection depth of Raman scattering lidar system*

Ren Xiu-Yun Tian Zhao-Shuo Sun Lan-Jun Fu Shi-You[†]

(Information Optoelectronics Research Institute, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

(Received 31 March 2014; revised manuscript received 5 April 2014)

Abstract

Airborne Raman scattering laser lidar technology can measure the three-dimensional (3D) distribution of subsurface seawater temperature rapidly, and it has important social and economic values. In this paper, firstly, the relationship between Raman stretching vibration spectrum peak position and excitation wavelength, and the relationship between the full width half maximum (FWHM) of Raman stretching vibration spectrum and excitation wavelength are analyzed theoretically. The results show that as the excitation wavelength increases, Raman scattering peak gradually shifts toward longer wavelength and the Raman spectrum FWHM increases noticeably. Secondly, to verify the theoretical results, the Raman spectra at different water temperatures excited by 450 nm and 532 nm lasers are measured experimentally, and the fitting analyses of them by single Gauss peak fitting method are made, the relationship between Gauss peak wavelength and temperature is obtained, and the effect of laser wavelength on the temperature measurement precision is analyzed. It is found that larger excitation wavelength can increase Raman spectrum measurement accuracy, thereby improving the temperature measurement precision. Finally, the Raman scattering lidar equation is established, the Raman scattering coefficients and attenuation coefficients of different wavelength lasers are analyzed, and the corresponding effects of laser wavelength on the lidar system detection depth are studied. Results show that the lidar system detection depth is greatly influenced by the laser wavelength, lidar system with laser wavelength below 480 nm has a good detection ability, and large wavelength laser greatly reduces lidar system detection depth. The effects of laser wavelength on both temperature measurement precision and detection depth should be considered in the design of Raman scattering lidar system.

Keywords: seawater temperature, Raman scattering, temperature measurement precision, detection depth

PACS: 42.68.Wt, 42.68.Xy, 42.62.Fi, 92.05.Hj

DOI: 10.7498/aps.63.164209

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41306092), the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (Grant No. ZR2013DQ026), the Science and Technology Key Program of Shandong Province, China (Grant No. 2011GHY11514), and the Fundamental Scientific Research Foundation for the Central Universities of China (Grant No. HIT.NSRIF.2013139).

[†] Corresponding author. E-mail: fsytzs@126.com