

文章编号: 0258-7025(2008)12-1975-06

262~272 nm 波段氯苯的激光质谱研究

马靖 丁蕾

(福州大学物理与信息工程学院, 福建 福州 350002)

摘要 在自行研制的具有恒温加热进样系统的激光质谱仪上获得了 262~272 nm 波段气相氯苯的(1+1)共振增强多光子电离/飞行时间质谱(REMPI-TOFMS)。研究表明,该波长范围内获得的光激发谱的光谱结构是氯苯第一激发态 $^1B_2(S_1)$ 振动能级的反映,对其中 14 条谱线进行了尝试性指认。分析了氯苯在 266 nm 波长处不同激光能量下的光电离质谱特点,讨论了造成 $^{77}C_6H_5^+$ 质谱的非对称增宽的原因。实验研究了 266 nm 波长处氯苯分子离子信号强度与样品浓度之间的关系,估算出氯苯的探测限为 ng/L 量级。

关键词 光谱学;激光质谱法;共振增强多光子电离;飞行时间质谱;氯苯

中图分类号 O 433.4;O 561.3;O 657.63 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083512.1975

Study of Chlorobenzene in the Range of 262~272 nm Using Laser Mass Spectrometry

Ma Jing Ding Lei

(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract The 1+1 two-photon resonant enhanced multiphoton ionization spectra of chlorobenzene were obtained at the range of 262~272 nm on the laser mass spectrometer with heatable sample inlet system which was designed by ourselves. The result shows that the structure of the excitation spectra in this wavelength range represents the first excited state $^1B_2(S_1)$ of the chlorobenzene. 14 spectrum lines were assigned. The characteristics of the photon ionization mass spectrum at 266 nm were analyzed. The non-symmetric broadening of the mass spectrometry of the $^{77}C_6H_5^+$ was analyzed. The relationship between the signal intensity of chlorobenzene and the sample concentration was studied. It is shown that the detection limit of the chlorobenzene is about ng/L range.

Key words spectroscopy; laser mass spectrometry; resonance-enhanced multiphoton ionization; time of flight mass spectrum; chlorobenzene

1 引言

激光质谱技术是一种二维分析方法,包括紫外(UV)光谱和飞行时间质谱(TOFMS)。该方法将共振增强多光子电离(REMPI)和飞行时间质谱技术有机地结合起来,具有快速(毫秒量级)、高灵敏度(小于 10^{-6} 量级)、高选择性(光谱、质谱二维选择)及多组分测量的特点^[1],广泛地应用于物质的光谱、质谱研究及环境检测等领域^[1~5]。氯苯是一种重要的环境污染物,近年来氯苯作为快速检测垃圾焚烧废弃物中二恶英类剧毒物质的良好替代物受到环境学家的广泛关注^[6~9]。张树东等^[10]通过共振增强

多光子电离方法对氯苯分子的 3d Rydberg 态进行了研究;有关氯苯光谱方面的研究主要集中在紫外吸收谱、基态及激发态的振动以及电子态的特征上^[11~13]。本文报道了 266 nm 波长处通过恒温加热进样系统获得的气相氯苯的质谱特点,对由氯苯光电离产生的 $C_6H_5^+$ ($M^+ = 77$) 质谱峰非对称增宽现象进行了分析。实验获得了氯苯 262~272 nm 波长范围氯苯的(1+1)共振增强多光子电离谱,对其中 14 个谱峰进行了指认。对氯苯进行了低浓度探测研究,研究表明,在本实验条件下,信噪比 $S/N = 2$ 时氯苯在 266 nm 波长处的探测限为 40 ng/L。

收稿日期:2007-12-03;收到修改稿日期:2008-03-30

基金项目:福建省教育厅 A 类科技项目(JA07027)和福建省教育厅 B 类科技项目(JB07014)资助课题。

作者简介:马靖(1977—),女,湖北人,讲师,博士,主要从事光学及环境光谱学研究。E-mail:majing@fzu.edu.cn

2 实验装置

实验装置如图 1 所示,主要包括:加热进样系统,飞行时间质谱仪,激光光源以及信号的探测、采集和处理部分。进样系统是自行设计的,主要由样品池、进样管道以及温度控制部分组成。样品池是容积为 5 L 的不锈钢池,样品池上接有真空压力表,样品池内的气体压力可以由压力表直接读出。整个进样管道分为两个部分,一部分是在飞行时间质谱仪以外,进样管道是外径为 6 mm,内径为 4 mm 的不锈钢管。另一部分是在飞行时间质谱仪的真空腔内,内外两部分进样管道是通过飞行时间质谱仪的法兰实现连接的。真空腔内是一个 U 型管道结构的进样管道,U 型管道的一端与从法兰外部接入的管道相连,另一端通过法兰接到飞行时间质谱仪外部,由球阀与机械泵相连。U 型管道的底部通过一根长为 40 mm,内外直径分别为 0.2 mm 及 1.2 mm 的金属针管把少量气流溢出到质谱仪的离子源区。金属针管的开口位于电离源中心以上约 2 mm 处。样品池及进样管道的外壁均采用电阻丝加热带对其进行加热。在电阻丝加热带外加有一个保温隔热层,以降低被加热的样品池与外界的热交换,温度由铂合金 Pt100 温度传感器测量,并通过温控仪(XM 系列数字温度指示调节仪,浙江正泰仪器仪表有限责任公司生产)进行显示和控制。实验前,先在样品池中配置一定浓度的 1.013×10^5 Pa 氯苯/氩样品气体,实验时样品气体通过 U 型管进入飞行时间质谱仪的真空腔,形成溢流束,进样量由安装在进样管道上的针阀控制,进样时电离区的真空为 3.99×10^{-3} Pa。气体样品与脉冲激光束在飞行时间质谱仪的离子引出电场中间垂直交叉,脉冲激光束经过置于真空腔外的焦距为 270 mm 的石英透镜聚焦进入电离室。电离产生的阳离子在电场的作用

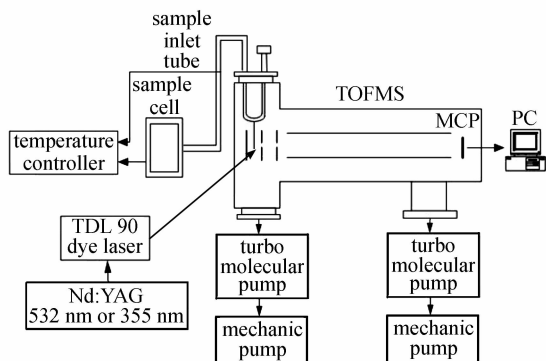


图 1 激光质谱实验装置

Fig. 1 Setup of laser mass spectrometry

下,进入长约 1.1 m 的自由漂移区,飞行管的末端由两块微通道板(MCP)收集离子信号。为了提高信噪比,质谱信号采用 100 次平均的结果,分质量光谱是由从微通道板输出的信号经过 Boxcar(SRS,250,242)平均后送到计算机处理得到的。飞行时间质谱仪中离子光学系统由三块电极板组成,三块电极板的电压分别为 +200 V, -200 V 及 -2400 V,形成排斥场和加速场。实验中所使用的激光波长范围为 262~272 nm, Nd:YAG 激光器(Brilliant B, 法国 Quantel 公司生产)的二倍频输出光抽运染料激光器(TDL90, Quantel),所用的染料为 Coumarin540,获得的波长可调谐基频染料光经过倍频晶体倍频后产生实验中所需要的光源。激光脉宽为 8 ns,重复频率为 10 Hz。激光波长由 0.3 m 光栅单色仪校准(WDG 30, 北京光学仪器厂生产)。

3 实验结果及讨论

图 2 是激光波长为 266 nm 时氯苯的飞行时间质谱,两幅质谱是在激光能量不同的情况下获得的,(a)中激光单脉冲能量为 100 μ J,(b)中激光单脉冲能量为 45 μ J。图中每个质谱峰上标明的数字是该离子的质荷比(m/e)。根据氯苯的化学结构,对较强的质谱峰进行了分析:高低不同的两种激光能量下,分子离子峰及碎片离子 $C_6H_5^+$ ($M^+ = 77$), $C_4H_3^+$ ($M^+ = 51$), $C_4H_2^+$ ($M^+ = 50$), $C_2H_3^+$ ($M^+ = 27$)的信号都比较强。在激光能量较高时, C_3H^+ ($M^+ = 37$)及 C^+ ($M^+ = 12$)的信号比较强,而能量再低时几乎观察不到。在图 2(a)中没有标出的强度比较弱的

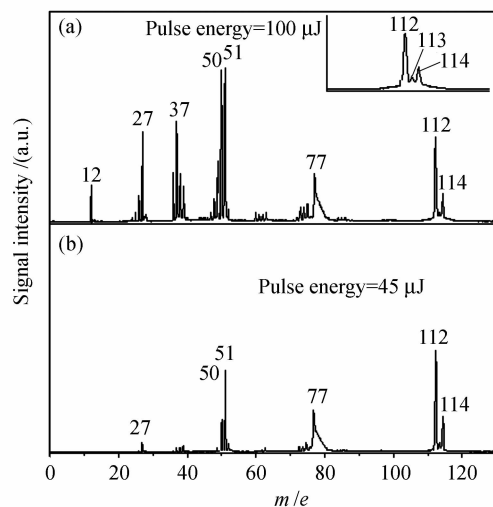


图 2 266 nm 波长处氯苯的光电离飞行时间质谱图

Fig. 2 TOFMS from the ionization of chlorobenzene at 266 nm

碎片离子峰有 $C_2H_x^+$ ($x = 0, 1, 2$), $C_3H_x^+$ ($x = 0, 2, 3$), $C_4H_x^+$ ($x = 0, 1, 4$) 以及 $C_6H_x^+$ ($x = 1, 2, 3$)。

从图 2 中可以明显分辨出氯元素 ^{35}Cl , ^{37}Cl 构成的分子离子峰 $^{12}C_6^{1}H_5^{35}Cl^+$ ($M^+ = 112$), $^{12}C_5^{13}C_1^{1}H_5^{35}Cl^+$ ($M^+ = 113$) 和 $^{12}C_6^{1}H_5^{37}Cl^+$ ($M^+ = 114$)。从图 2(a) 中插图可知氯苯分子离子峰的信号强度比约为 $^{112}M^+ : ^{113}M^+ : ^{114}M^+ = 1:0.1:0.3$, 其理论值为 $^{112}M^+ : ^{113}M^+ : ^{114}M^+ = 1:0.07:0.32$ ^[14]。在采用 266 nm 激光进行复杂混合物探测时, 若存在质量数为 112, 113 及 114 的离子, 其信号强度比若近似为 1:0.1:0.3, 则可将此作为判断氯苯是否存在的依据之一。

从图 2 中可以看出 $C_6H_5^+$ ($M^+ = 77$) 质谱峰出现了严重的增宽, 并且质谱峰的加宽不对称, 质谱信号强度向着较长飞行时间的方向减弱。由于质谱中的其他谱峰分辨率良好, 故 $C_6H_5^+$ ($M^+ = 77$) 质谱峰的增宽不会是由于质谱仪的分辨率造成的, 而是与该离子的形成速率有关, 相对较慢的形成速率引起了质谱中 $C_6H_5^+$ ($M^+ = 77$) 质谱峰的形变。通过分析飞行时间质谱仪的离子轨迹可知, 实验中所使用的飞行时间质谱仪的离子源主要由三块极板组成, 形成两个区域: 第一块极板和第二块极板之间压差为 400 V, 为电离区; 第二块极板和第三块极板之间压差为 2200 V, 为加速区。各离子在加速区获得大部分动能, 只有一小部分动能从电离区获得。通常情况下, 一个激光脉冲时间内在电离区中心产生母体离子和碎片离子, 离子获得相同的动能, 由于其质量不同从而以不同的速度进入自由飞行区而被区分开, 它们各自的质谱分辨率与其质量有关。如果碎片离子是在母体离子被加速的过程中产生的, 而非产生于电离区中心, 那么它们在自由飞行区的飞行时间就要比产生于电离区中心的相同离子滞后, 这样就会出现质谱峰非对称增宽的现象。从图 2 中可以观察到 $C_6H_5^+$ ($M^+ = 77$) 质谱峰明显的“拖尾”现象, 这说明该离子的形成速率要晚于其他离子。

在一定的激光能量范围内, 生成氯苯分子离子的同时还出现了较强的碎片离子, 对分子离子及一些碎片离子的产生过程进行了分析。多光子电离离子信号强度 P 与多光子跃迁几率成正比, 而多光子跃迁几率与激光强度 I 的 n 次方成正比: $P = C \times I^n$, 其中 C 为比例常数。将上式两边取对数, 即 $\lg P = \lg C + n \times \lg I$ 。可以看出, 在 I 和 P 分别为横、纵坐标的双对数坐标系中, 信号强度随激光强度的变化关系为一直线, 其斜率 n 定义为多光子电离过程

的光强指数, 它表征着形成该离子所需要吸收的光子数目。对于非共振的多光子过程, n 为样品分子电离所连续吸收的光子数。在 $(n_1 + n_2)$ REMPI 过程中, n 的变化比较复杂。在低光强时, $n = n_1 + n_2$, 反映了分子电离所需要的光子数; 在高光强时, 由于光吸收饱和 n 逐渐减小。图 3 分别给出了 266 nm 波长下, 氯苯分子离子和几种主要碎片离子的信号强度与激光能量的双对数关系图, 利用最小二乘法拟合得到各离子的光强指数, 线性度 R 均大于 0.995。

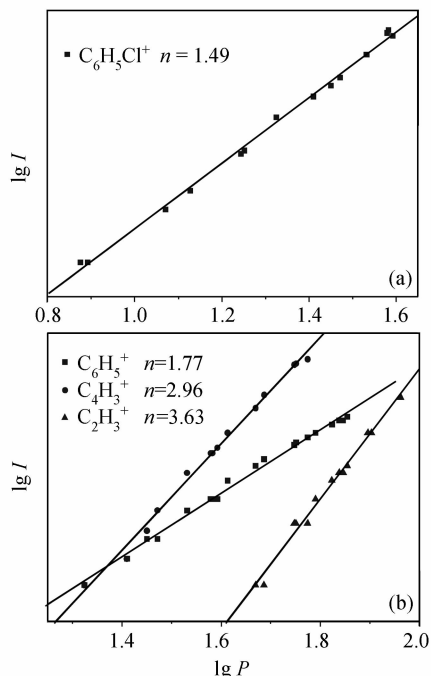
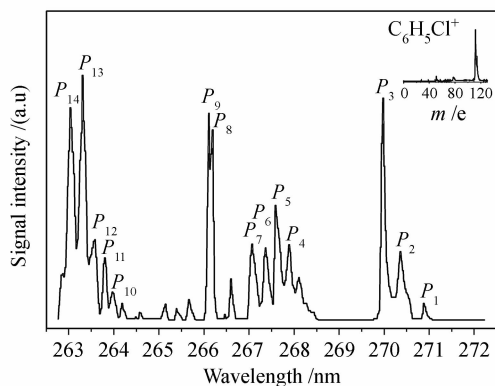


图 3 266 nm 波长下激光强度与离子信号强度的双对数图

Fig. 3 Double-logarithm of ions signal intensity versus laser energy at 266 nm

氯苯的电离势为 9.07 eV, 266 nm 激光的光子能量约为 4.67 eV, 一个 266 nm 的光子可以将氯苯激发到其第一激发态, 因此氯苯分子离子 $C_6H_5Cl^+$ 的产生是经由其第一激发态的 (1+1) 电离过程。图 3(a) 中氯苯分子离子 $C_6H_5Cl^+$ 的光强指数为 1.49, 并非为 2。实验中所采用的电离激光通过透镜聚焦, 功率密度大于 10^7 W/cm², 因而出现饱和效应。激光能量与信号强度间的“3/2 次幂理论”在文献 [15] 中有详细阐述。图 3(b) 中几种碎片离子 $C_6H_5^+$, $C_4H_3^+$ 及 $C_2H_3^+$ 的光强指数分别为 1.77, 2.96 和 3.63, 这说明产生这些碎片离子所需要吸收的光子数各不相同。通过对在国家同步辐射实验室进行的氯苯光电离研究结果分析可以知道, $C_6H_5^+$ 及 $C_4H_3^+$ 的出现势为 $AP(C_6H_5^+) = (12.96 \pm$

图 4 262~272 nm 氯苯分子离子 $C_6H_5^{35}Cl^+$ 的光激发谱Fig. 4 Excitation spectra of $C_6H_5^{35}Cl^+$ in the range of 262~272 nm表 1 氯苯振动模的对称性及其在基态 S_0 和第一激发态 S_1 的频率Table 1 Symmetries and frequencies of vibrational modes of chlorobenzene in S_0 and S_1 states

Mode (Wilson No.)	Species	$S_0 (^1A_1)$	$S_1 (^1B_2)$
20a		(3082)	3158.2
2		(3054)	3118.7
13		(3031)	3083.8
8a		1586.4	1564.3
19a		1482.3	1489
9a	a_1	1153	1065.1
7a		1092.6	980.6
18a		1025.7	965.7
1		1003.7	931.3
12		706.5	671.3
6a		416.8	378.2
17a		962	729
10a	a_2	831	616
16a		403	203
5		981	699
17b		903	655
10b		741	556
4	b_1	684	422
16b		467	320
11		197	138
20b		(3096)	3076
7b		(3067)	3056
8b		1598.2	1584.4
19b		1447.2	1483.2
14	b_2	1326.6	1210.1
3		1271.8	1194.3
9b		1167.1	1149.4
15		1067.6	1089.7
6b		614.9	521
18b		294.7	287.3

0.05)eV, $AP(C_4H_3^+) = (16.49 \pm 0.05)eV^{[16]}$, 说明氯苯需要直接吸收三个(四个)266 nm光子才能生成 $C_6H_5^+$ ($C_4H_3^+$), $C_6H_5^+$ 及 $C_4H_3^+$ 有可能是由氯苯分子直接电离产生的。

图 4 给出了 262~272 nm 波长范围内氯苯分子离子 $C_6H_5^{35}Cl^+$ 的信号强度与激发波长之间的关系, 其中右上角的插图为采集光谱时氯苯典型的共振增强多光子飞行时间质谱。

氯苯分子的电离势 (IP) 为 9.07 eV, 约合 73176 cm^{-1} 。氯苯属于 C_{2v} 点群, 有 4 个不可约表示 a_1, a_2, b_1 和 b_2 , 其 30 个简正振动模分属于这 4 个对称类, 其基态 S_0 和第一激发态 S_1 的对称性分别为 1A_1 和 1B_2 。氯苯 $^1B_2(S_1) \leftarrow ^1A_1(S_0)$ 跃迁的带头位于 37050 cm^{-1} , 一个 262~272 nm 的光子可以将氯苯从基态 $^1A_1(S_0)$ 激发到第一激发态 $^1B_2(S_1)$ 。图 4 中多个波长处的谱峰体现出氯苯第一激发态 $^1B_2(S_1)$ 的振动结构。整幅图中大约有 21 个谱峰可以明显分辨, 由于多原子分子振动结构的确认存在泛频、合频及 Femi 共振等因素因而变得十分复杂, 根据氯苯分子基态和第一激发态振动模的频率, 以及光谱标识的规律, 对其中 14 个谱峰进行了尝试性指认^[11~13], 如表 1 和表 2 所示。

表 2 氯苯分子第一激发态 $^1B_2(S_1)$ 的振动结构Table 2 Vibrational levels of $^1B_2(S_1)$ state of chlorobenzene

Peaks	Wavelength /nm	Wave number / cm^{-1}	Assignment ^[12,13]
P ₁	270.85	36921	$10b_0\ ^14_1\ ^0$
P ₂	270.36	36988	$11_1\ ^1$
P ₃	269.95	37044	$0_0\ ^0$
P ₄	268.14	37294	
P ₅	267.83	37337	$18b_0\ ^1$
P ₆	267.63	37365	$6b_0\ ^16a_1\ ^1$
P ₇	267.25	37418	$6a_0\ ^1$
P ₈	267.03	37449	$6b_0\ ^14_1\ ^1$
P ₉	266.61	37508	
P ₁₀	266.24	37560	$6b_0\ ^1$
P ₁₁	266.21	37564	$16a_0\ ^16b_0\ ^1$
P ₁₂	265.31	37692	
P ₁₃	265.10	37722	
P ₁₄	264.56	37799	
	264.12	37862	
	263.94	37887	$4_0\ ^2$
	263.74	37916	$1_0\ ^111_1\ ^1$
	263.58	37939	$6a_0\ ^16b_0\ ^1$
	263.33	37975	$1_0\ ^1$
	263.09	38010	$18a_0\ ^1$
	262.93	38033	

266 nm 激光可以通过结构简单的 Nd:YAG 的四倍频获得,具有很强的实用性,因此对氯苯在该波长进行了低浓度探测的研究。实验配置了 8 种不同浓度的氯苯样品气体,图 5 给出了氯苯在 266 nm 激光作用下的氯苯浓度和 $C_6H_5^{35}Cl^+$ 信号强度之间的关系。由于多光子电离过程中产物的离子信号强度除了与物质浓度成正比之外,激光强度对其的影响很大,以 15 μJ 激光能量为基准对 $C_6H_5^{35}Cl^+$ 信号强度进行了归一化处理。从图中可看出氯苯样品气体的浓度与 $C_6H_5^{35}Cl^+$ 信号强度成线性关系,式 $d = \frac{c}{p - \bar{m}} 2\sigma^{[17]}$ 中 d 为探测限, σ 为质谱峰之间的噪声大小, \bar{m} 为噪声的平均值, c 为样品的浓度。根据式中各参数的数值,可以推算出信噪比 $S/N = 2$ 时氯苯在 266 nm 处的探测限为 40 ng/L。

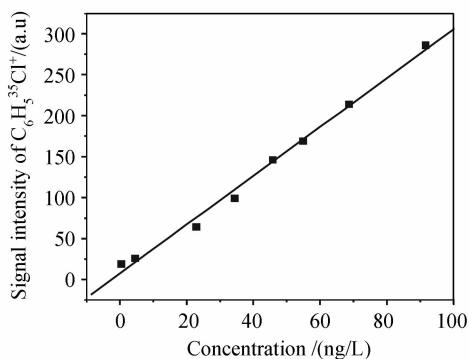


图 5 氯苯样品气体浓度与 $C_6H_5^{35}Cl^+$ 信号强度之间的关系

Fig. 5 Relationship between sample concentration and signal intensity of $C_6H_5^{35}Cl^+$

4 结 论

报道了在自行研制的具有恒温加热进样系统的激光质谱仪上获得的 262~272 nm 波段气相氯苯的 (1+1) 共振增强多光子电离/飞行时间质谱。从氯苯分子离子 $C_6H_5^{35}Cl^+$ 的光激发谱中可以观察到 22 条谱线,它们是由处于基态 $^1A_1(S_0)$ 的氯苯分子跃迁到第一激发态 $^1B_2(S_1)$ 从而电离产生的,对其中 14 条谱线进行了尝试性的指认。分析了氯苯在 266 nm 波长处不同激光能量下的光电离质谱特点,碎片离子 $C_6H_5^+$ 质谱的非对称增宽应该是由其较慢的形成速率引起的。实验获得了 266 nm 波长处氯苯分子离子信号强度与样品浓度之间的关系,由此可以估算出在本实验室条件下,信噪比 $S/N = 2$ 时,氯苯的探测限为 40 ng/L。

致谢 感谢中国科学院安徽光学精密机械研究所的

方黎研究员和张为俊研究员在实验上给予的指导和帮助。

参 考 文 献

- Ma Jing, Ding Lei, Gu Xuejun *et al.*. Rapid detection of chloroethylenes using laser mass spectrometry [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9):1202~1206
马 靖, 丁 蕾, 顾学军 等. 激光质谱法对氯代乙烯的痕量快速检测研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(9):1202~1206
- Zhang Liandi, Wei Jie, Fang Li *et al.*. Resonance enhanced multiphoton ionization mass spectra of C_2H_5I [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(2):176~180
章莲蒂, 魏 杰, 方 黎 等. 碘乙烷分子共振增强多光子电离飞行时间的质谱研究[J]. 中国激光, 1999, **A26**(2):176~180
- Wang Chuanhui, Dai Lin, Zhang Xianyi *et al.*. Investigation on laser-induced breakdown spectroscopy of $AlCl_3$ water solution [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1190~1194
王传辉, 戴 琳, 张先懿 等. $AlCl_3$ 水溶液的激光诱导击穿光谱研究[J]. 中国激光, 2006, **33**(9):1190~1194
- Wang Tiejun, Zhang Lei, Dong Lei *et al.*. Minimum detection limit for methane with single laser remote sensing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(3):405~407
王铁云, 张 雷, 董 磊 等. 激光遥测甲烷气体最低可探测浓度[J]. 中国激光, 2006, **33**(3):405~407
- Min Wang, Yujun Zhang, Jianguo Liu *et al.*. Applications of a tunable diode laser absorption spectrometer in monitoring greenhouse gases [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(6):363~365
- H. Oser, K. Copic, M. J. Coggiola *et al.*. Congener-specific detection of dioxins using jet-REMPI [J]. *Chemosphere*, 2001, **43**(4):469~477
- J. Matsumoto, B. Nakano, T. Imasaka. Development of a compact supersonic jet/multiphoton ionization/time-of-flight mass spectrometer for the on-site analysis of dioxin, part II: application to chlorobenzene and dibenzofuran [J]. *Anal. Sciences*, 2003, **19**(3):383~386
- K. Tonokura, T. Nakamura, M. Koshi. Detection of chlorobenzene derivatives using vacuum ultraviolet ionization time-of-flight mass spectrometry [J]. *Analytical Sciences*, 2003, **19**(8):1109~1113
- H. J. Heger, R. Zimmermann, M. Blumenstock *et al.*. On-line real-time measurements at incineration plants: PAHs and a PCDD/F surrogate compound at stationary combustion conditions and during transient emission puffs [J]. *Chemosphere*, 2001, **42**(5):691~696
- Zhang Shudong, Guo Wenyue, Fang Li *et al.*. Multiphoton ionization spectroscopy study of chlorobenzene in 3d Rydberg state [J]. *Chinese Journal of Atomic and Molecular Physics*, 1998, **15**(2):153~158
张树东, 郭文跃, 方 黎 等. 氯代苯分子 3d Rydberg 态的共振多光子电离光谱研究[J]. 原子与分子物理学报, 1998, **15**(2):153~158
- H. D. Bist, V. N. Sarin, A. Ojha *et al.*. The 2699 Å electronic band system of chlorobenzene — the in-plane vibrational modes in the excited state [J]. *Applied Spectroscopy*, 1970, **24**(2):292~294
- Y. S. Jain, H. D. Bist. The out-of-plane vibrational modes of chlorobenzene in its ground and first singlet excited states [J]. *Journal of Molecular Spectroscopy*, 1973, **47**(1):126~133
- H. Spöner, S. H. Wollman. Analysis of the near ultraviolet absorption spectrum of monochlorobenzene [J]. *Journal of Chemical Physics*, 1941, **9**(11):816~825
- R. Zimmermann, H. J. Heger, M. Blumenstock *et al.*. On-line measurement of chlorobenzene in waste incineration flue gas

- as a surrogate for the emission of polychlorinated dibenzo-p-dioxins/furans(1-TEQ) using mobile resonance laser ionization time-of-flight mass spectrometry [J]. *Rapid Communication in Mass Spectrometry*, 1999, **13**(5):307~314
- 15 S. H. Lin, Y. Fujimura, H. J. Neusser *et al.*. Multiphoton Spectroscopy of Molecules [M]. America: Academic Press, Inc., 1984. 96~97
- 16 Ma Jing, Ding Lei, Gu Xuejun *et al.*. Photoionization studies of chlorobenzene using synchrotron radiation [J]. *Chinese Journal of Chemical Physics*, 2005, **18**(6):872~876
- 马 靖, 丁 蕾, 顾学军 等. 氯苯的同步辐射光电离研究[J]. *化学物理学报*, 2005, **18**(6):872~876
- 17 H. J. Heger, R. Zimmermann, R. Dorfner *et al.*. On-line emission analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons at pptv concentration levels in the flue gas of an incineration pilot plant with mobile REMPI-TOF-MS [J]. *Anal. Chem.*, 1999, **71**(1): 46~57

《中国激光》“光纤通信及器件”专题征稿启事

光纤技术和网络技术的迅猛发展,对现代光通信技术的发展产生了巨大的推动作用,尤其在光纤通信系统及器件的设计与实现方面,已取得了诸多令人兴奋的成就。《中国激光》计划于2009年3月正刊上推出“光纤通信及器件”专题栏目,现特向国内外广大读者以及作者征集“光纤通信及器件”方面原创性的研究论文和综述,旨在集中反映该方面最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

- 光纤通信系统的设计及实现
- 光纤激光器的设计与实现(如掺杂光纤激光器、新型可调谐光纤激光器、微结构光纤激光器等)
- 光纤放大器的设计与实现(如宽波段掺铒光纤放大器、拉曼光纤放大器、微结构光纤放大器等)
- 全光纤无源器件的设计与实现(如宽带光纤耦合器、宽带光纤滤波器、新型光纤色散补偿器、阵列光开关等)
- 新型光纤光栅的设计与实现(如微结构光纤光栅、超长周期光纤光栅及特种光纤光栅等)
- 其他

截稿日期:2009年1月10日

投稿方式以及格式:通过网上投稿系统(<http://www.opticsjournal.net/zgjg.htm>)直接上传稿件(主题标明“光纤通信及器件”投稿),也可直接将稿件电子版发至邮箱:zhgjg@mail.shcnc.ac.cn(主题标明“光纤通信及器件”投稿),详情请参见中国光学期刊网:www.opticsjournal.net。本专题投稿文体不限,中英文皆可,其电子版请使用MS-word格式,有任何问题请发邮件至zhgjg@mail.shcnc.ac.cn询问。

《中国激光》编辑部