论文

介电泳操控不同基团修饰多壁碳纳米管气体传感器对 SO₂ 的气敏性能冯利利^{①*}, 王海波^①, 陈慧英^{②*}^① 北京建筑大学城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京市应对气候变化研究及人才培养基地, 北京 100044;^② 中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100081

*联系人, 冯利利, E-mail: sharpfl@buaa.edu.cn; 陈慧英, E-mail: huiyingchen@aliyun.com

收稿日期: 2015-04-16; 接受日期: 2015-06-12; 网络出版日期: 2015-07-30

国家自然科学基金(批准号: 51206009)、国家留学基金委项目(编号: 201408110015)和北京市青年英才项目(编号: YETP1663)资助

摘要 利用介电泳法在铬-银-金微电极上制备了本征多壁碳纳米管(MWNTs)气体传感器及不同基团修饰多壁碳纳米管(MWNTs-x, x: NH₂, OH, COOH)气体传感器, 考察了 MWNTs 和 MWNTs-x 在非均匀电场中的介电响应行为, 将 8 V, 2 MHz 的电泳参数确定为多壁碳纳米管气体传感器的制备条件; 在介电泳力作用下 MWNTs 和 MWNTs-x 的颗粒均被捕获到电极尖端, 发生了正介电泳(p-DEP). 室温下研究了制备的气体传感器对不同浓度二氧化硫(SO₂)的气敏性能, 研究发现传感器对 SO₂ 的响应时间、恢复时间和灵敏度随 SO₂ 气体浓度的增加而增大, 不同基团修饰 MWNTs 气体传感器对 SO₂ 的灵敏度较本征 MWNTs 传感器的灵敏度显著提高, 氨基修饰 MWNTs(MWNTs-NH₂)气体传感器的灵敏度最高, 为本征 MWNTs 气体传感器的 17–23 倍, 碳管与 SO₂ 间的毛细力、表面张力、氢键、化学键等相互作用为影响传感器气敏性能的因素.

关键词 介电泳操控, 多壁碳纳米管, 基团修饰, 气体传感器, 二氧化硫

PACS: 81.07.De, 81.05.U-, 81.05.Rm, 82.47.Rs

doi: 10.1360/SSPMA2015-00165

碳纳米管(Carbon Nanotubes, CNTs)因其独特的力学、化学、电学等性能, 在微纳电子器件、传感器、场致发射、显示、储氢、电池、复合材料等诸多领域被广泛研究^[1–3]. CNTs 与吸附的气体分子相互作用其费米能级发生改变, 因而可利用 CNTs 电阻发生的变化来检测气体, 以 CNTs 为气体传感器的研究吸引了

人们的研究兴趣, 与其他传感器相比, CNTs 气体传感器具有响应速度快、灵敏度高、尺寸小、能耗低和室温下工作等特点^[4,5].

人们在单壁碳纳米管(SWNTs)气体传感器室温检测 NO₂、NH₃、有机蒸气(丙酮、苯、硝基甲苯)、SF₆ 解离气^[6–8]和多壁碳纳米管(MWNTs)气体传感器

引用格式: 冯利利, 王海波, 陈慧英. 介电泳操控不同基团修饰多壁碳纳米管气体传感器对 SO₂ 的气敏性能. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 096801
Feng L L, Wang H B, Chen H Y. The gas sensing performances of gas sensors based on the dielectrophoretically manipulated multi-wall carbon nanotubes with various functionalized groups towards SO₂ (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2015, 45: 096801, doi: 10.1360/SSPMA2015-00165

室温检测 CO_2 、 O_2 、 NH_3 、 CO 、 NO_2 、水蒸气、氯仿、氢气、甲醛^[2,9-13]等方面开展了大量研究工作. SWNTs 气体传感器的主要性能优于传统传感器, 但其恢复时间较长; MWNTs 气体传感器与 SWNTs 气体传感器一样都在室温下工作, 但灵敏度相对较低. 进一步提高 CNTs 气体传感器的灵敏度、增强检测选择性、缩短响应时间和恢复时间为 CNTs 气体传感器研究领域面临的挑战, 人们尝试对 CNTs 表面进行功能化修饰或利用介电泳(Dielectrophoresis, DEP)技术操控气体传感器来解决上述问题.

对 CNTs 气体传感器功能化修饰的报道有利用苯功能化的 SWNTs 气体传感器检测^[8] SF_6 解离气, 氧化锡修饰的 MWNTs 检测 NO_2 和 CO ^[10], 聚乙二醇功能化的羧基 MWNTs 气体传感器检测氯仿^[11], 酸功能化的 MWNTs 检测氢气^[12], 氨基修饰的 MWNTs 检测甲醛^[13]等. 利用介电泳技术操控 CNTs 制备的气体传感器主要用来检测 NO_2 ^[14,15]、 NH_3 ^[16]、三甲胺^[17]和 SF_6 ^[18]等. 上述传感器的应用尚未有 SO_2 气体检测方面的报道, 而 SO_2 众所周知为导致酸雨和酸性烟雾的主要空气污染物来源^[19].

本文利用介电泳技术在铬-银-金微电极上制备了不同基团修饰多壁碳纳米管(MWNTs, MWNTs-OH, MWNTs-NH₂, MWNTs-COOH)气体传感器, 研究了制备的 4 种气体传感器室温下对 SO_2 气体的气敏性能, 旨在利用功能化修饰方法和介电泳技术为多壁碳纳米管 SO_2 气体传感器的开发提供新途径.

1 实验部分

1.1 实验材料

多壁碳纳米管(MWNTs)购自美国 Cheaptubes, 由化学气相沉积法合成, 纯度大于 99%, 利用等离子体处理 MWNTs 得到不同基团修饰的多壁碳纳米管(MWNTs-NH₂, MWNTs-OH, MWNTs-COOH), 根据供应商提供的 X 射线电子能谱(XPS)和滴定结果可知官能团含量为 (7±1.5)wt%, 采用氮气吸附法在 Quantachrome Autosorb-iQ-MP 气体吸附分析仪上测得的 MWNTs 材料的多孔性质如表 1 所示.

介电泳微电极阵列芯片以 76 mm×25 mm×2 mm 规格的石英玻璃片(北京京奇辉石英制品有限责任公司)为绝缘基片, 采用真空蒸镀技术在石英玻璃基片上加工厚度为 100 Å、形状为指凸型、电极宽 40 μm、

通道宽 40 μm 的铬-银-金微电极(中国科学院半导体研究所).

二氧化硫(SO_2)气体由无水亚硫酸氢钠(NaHSO_3 , 分析纯, 北京化工厂)与 98%浓硫酸(H_2SO_4 , 分析纯, 北京化工厂)反应制得, 用空气稀释纯 SO_2 配置不同浓度(10, 20, 40, 60, 80 和 100 ppm)的 SO_2 气体, 采用无水硫酸铜、硅胶对其进行干燥.

1.2 实验装置

介电泳操控多壁碳纳米管气体传感器气敏性能研究装置如图 1 所示. 实验装置由两部分组成, 一是介电泳法制备碳纳米管气体传感器部分, 包括函数信号发生器(SG1651 型, 江苏洪泽瑞特电子设备有限公司)、微电极阵列芯片、显微镜(CN15-T31 型, 日本光器公司)、数码摄像头和电脑; 二是碳纳米管气体传感器气敏性能测试部分, 包括电脑、万用表(UT805A 型, 深圳市源恒通科技有限公司)、气球收集器、密闭气室、CNTs 气体传感器、注射器和推进器(TS2-60 型, 保定兰格恒流泵有限公司).

1.3 实验方法

电泳液的配制. 取 2 mg 碳纳米管溶解于 100 mL 蒸馏水中, 在超声振荡清洗器(KQ250E 型, 昆明市超声仪器有限公司)中超声振荡 20 min 得到分散性较好的溶液后储存备用, 每次使用前再超声振荡 5 min.

介电泳法制备碳纳米管气体传感器参数的确定. 利用函数信号发生器设置电压和频率, 取一定量分散好的电泳液滴加在微电极上, 通过显微镜观察碳纳米管颗粒在介电泳力作用下的运动状态, 改变电压和频率获得介电泳法制备碳纳米管气体传感器的较佳参数.

气敏性能测试. 注射器抽取一定浓度的待测气体, 用推进器以 100 mL/h 的速度将气体注入传感器所在的密闭气室, 利用电脑上的 UNI-T 分析软件记录进气前后传感器电阻值变化. 采用(1)式计算传感器的灵敏度. 测试结束后通入空气使碳纳米管上的

表 1 多壁碳纳米管(MWNTs)的多孔性质

Table 1 Porous characteristics of the MWNTs materials

Materials	S_{BET} ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	V_{pore} ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$)	D_{pore} (nm)
MWNTs	224	1.86	33.2
MWNTs-NH ₂	206	2.12	41.2
MWNTs-OH	205	2.31	45.3
MWNTs-COOH	178	1.97	44.2

图 1 (网络版彩图)介电泳操控多壁碳纳米管气体传感器气敏性能研究装置图

1-函数信号发生器; 2-微电极阵列芯片; 3-显微镜; 4-数码摄像头; 5-电脑; 6-万用表; 7-气球收集器; 8-密闭气室; 9-CNTs 气体传感器; 10-注射器; 11-推进器

Figure 1 (Color online) The experimental set-up for investigating gassensing performances of gas sensors based on the dielectrophoretically manipulated multi-wall carbon nanotubes. 1-Function signal generator; 2-microelectrode array chip; 3-microscope; 4-digital camera; 5-computer; 6- multimeter; 7-balloon collector; 8-closed gas chamber; 9-CNTs gas sensor; 10-injector; 11-propeller.

气体脱附, 实验中未被吸附和实验后脱附的气体由密闭气室一端的气球收集。

$$S = \frac{R_1 - R_0}{R_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中, R_0 为传感器的初始电阻值, R_1 为传感器暴露于待测气体中电阻再次达到稳定时的测试值。

2 结果与讨论

2.1 介电泳法排布 MWNTs 制备气体传感器

介电泳操控下 MWNTs 在微电极芯片上的排布如图 2 所示。与图 1 中的空白电极相比, 图 2 中在介电泳力作用下本征 MWNTs 和不同基团修饰 MWNTs

的颗粒均被电极尖端捕获, 表明 MWNTs 颗粒发生了正介电泳(p-DEP)。MWNTs 颗粒被电极尖端吸附的量越多, 正介电泳现象越明显, 由此确定的介电泳法排布 MWNTs 的最佳电压和频率分别为: MWNTs 17 V, 3 MHz; MWNTs-NH₂ 15 V, 3 MHz; MWNTs-OH 8 V, 2 MHz; MWNTs-COOH 16 V, 3 MHz。MWNTs-OH 发生正介电泳的最佳参数(8 V, 2 MHz)较其他 3 种碳纳米管的低, 在 8 V, 2 MHz 条件下研究发现 MWNTs, MWNTs-NH₂ 和 MWNTs-COOH 颗粒也可以被电极尖端捕获, 基于节电及在相同参数下制备的气体传感器上考察气敏性能的可比性, 因此在气敏性能研究中采用 8 V, 2 MHz 的介电泳参数制备的 4 种 MWNTs 气体传感器。

图 2 (网络版彩图)介电泳操控下 MWNTs 颗粒在微电极芯片上的分布

(a) 本征多壁碳纳米管; (b) 氨基修饰多壁碳纳米管; (c) 羟基修饰多壁碳纳米管; (d) 羧基修饰多壁碳纳米管

Figure 2 (Color online) The distribution of MWNTs particles on the microelectrode chips by dielectrophoretic manipulation. (a) MWNTs; (b) MWNTs-NH₂; (c) MWNTs-OH; (d) MWNTs-COOH.

2.2 MWNTs 气体传感器的气敏性能

检测气体传感器对不同浓度气体的反应灵敏度、响应时间和恢复时间是表征气体传感器气敏性能的一个重要途径. 图 3 为介电泳法制备的 MWNTs 传感器室温下对不同浓度 SO_2 的响应. 由图 3 可见, 当环境中有 SO_2 通入时, MWNTs 气体传感器在接触到 SO_2 后电阻立即上升, 经过一定响应时间后, 电阻达到稳态, 表明 SO_2 在 MWNTs 上的吸附使 MWNTs 传感器的导电能力下降, 且各传感器的导电能力随 SO_2 气体浓度的增加而下降. SO_2 使 MWNTs 传感器导电能力下降归因于 MWNTs 为 P 型半导体, 其主要载流子为“空穴”, 强还原性气体 SO_2 与其接触时, 电子进入其中与空穴复合, 空穴浓度减少, 从而导致 MWNTs 的导电能力下降, 该结果与文献报道一致, Cantalini 等人^[20]认为, 氧化性气体如 NO_2 吸附在属于 P 型半导体的 MWNTs 表面时, 气体分子夺取碳管的电子, 使空穴浓度增大, MWNTs 导电能力上升; 相反, 还原性气体如 NH_3 则使 MWNTs 的电导下降.

当环境中有空气流通入时, SO_2 被排出气室, 传感器的电阻下降, 经过一定恢复时间后, 电阻达到稳态, 但电阻值较通入 SO_2 前的初始电阻值略高, 表明 SO_2 未从传感器上完全脱附, 这是因为气体分子与碳管之间同时存在物理吸附和化学吸附, 碳管内部吸附作用较弱, 以物理吸附为主, 碳管管壁附近因存在大量结构缺陷表面活化能较高, 以化学吸附为主, 化学吸附作用较强, 在空气流吹扫下 SO_2 并不能完全从碳管上脱附.

由图 3 可以算出传感器对 10, 20, 40, 60, 80 和 100 ppm 浓度的 SO_2 的响应时间和恢复时间(如表 2 所示)以及灵敏度(如图 4 所示). 由表 2 可知, MWNTs, MWNTs- NH_2 , MWNTs-OH 和 MWNTs-COOH 传感器对 10–100 ppm 的 SO_2 的响应时间分别为 1–5 min, 0.6–5 min, 4–7 min 和 1–6 min, 恢复时间分别为 0.8–9 min, 0.8–7 min, 1–5 min 和 2–10 min, 各传感器的响应时间和恢复时间随 SO_2 浓度的升高而增加.

由图 4 可见, 4 种传感器对 SO_2 的灵敏度均随 SO_2

图 3 介电泳法制备的 MWNTs 气体传感器对不同浓度 SO_2 的响应

Figure 3 Response of MWNTs gas sensors fabricated by DEP process towards different concentrations of SO_2 .

表 2 介电泳法制备的 MWNTs 气体传感器对不同浓度 SO_2 的响应时间和恢复时间

Table 2 The response time and recovery time of MWNTs gas sensors fabricated by DEP process towards different concentrations of SO_2

Gas sensors	Response time and recovery time (min) towards different SO_2 concentrations (ppm)					
	10	20	40	60	80	100
MWNTs	1, 0.8	2, 1	2, 2	3, 4	4, 5	5, 9
MWNTs- NH_2	0.6, 0.8	2, 2	3, 3	4, 3	5, 6	5, 7
MWNTs-OH	4, 1	4, 1.5	4, 1.9	7, 3	7, 5	7, 5
MWNTs-COOH	1, 2	4, 4	5, 5	5, 7	6, 7	6, 10

图 4 (网络版彩图)介电泳法制备的 MWNTs 气体传感器对不同浓度 SO_2 的灵敏度

Figure 4 (Color online) The sensitivity of MWNTs gas sensors fabricated by DEP process towards different concentrations of SO_2

浓度的增加而增大;基团修饰 MWNTs 传感器对 SO_2 的灵敏度较本征 MWNTs 传感器的灵敏度显著提高;MWNTs- NH_2 传感器的灵敏度最高,对不同浓度的 SO_2 而言, MWNTs- NH_2 传感器的灵敏度为本征 MWNTs 传感器灵敏度的 17–23 倍. MWNTs, MWNTs- NH_2 , MWNTs-OH 和 MWNTs-COOH 气体传感器的初始电阻分别为: 10.331, 0.631, 1.330 和 2.837 $\text{k}\Omega$, 基团修饰 MWNTs 的初始电阻明显低于本征 MWNTs 的, MWNTs- NH_2 的初始电阻最低. 初始电阻越低, 通入待测气体后, 电阻随气体浓度变化越明显, 因而气体

传感器灵敏度越高, 这与 MWNTs- NH_2 气体传感器灵敏度最高的实验结果一致. 结合表 1, 本征 MWNTs 的 BET 比表面积大于基团修饰 MWNTs(MWNTs-x) 的, 表明 MWNTs 的表面张力强于 MWNTs-x; MWNTs 的孔尺寸小于 MWNTs-x 的, 表明 MWNTs 的孔的毛细力强于 MWNTs-x 的. 由于 SO_2 气体分子是通过毛细力作用吸附到碳管的孔道内, 通过表面张力吸附到碳管表面, 那么 MWNTs 对 SO_2 的吸附理论上应该强于 MWNTs-x 对 SO_2 的, 所以 MWNTs 对 SO_2 的灵敏度理应高于 MWNTs-x 的, 这与图 4 灵敏度的结果相反, 因此其他的因素如碳管上官能团 (- NH_2 , -OH, -COOH) 与 SO_2 的氢键作用、- NH_2 与 SO_2 的酸碱反应等也应该考虑在内, 即 MWNTs-OH 和 MWNTs-COOH 与 SO_2 的相互作用以毛细力、表面张力、氢键为主, MWNTs- NH_2 与 SO_2 的相互作用以毛细力、表面张力、氢键、化学键为主, MWNTs 与 SO_2 的相互作用以毛细力和表面张力为主, MWNTs-x 与 SO_2 的相互作用强于 MWNTs 与 SO_2 的, MWNTs- NH_2 对 SO_2 的作用最强, 因此 MWNTs-x 对 SO_2 的灵敏度高于 MWNTs 的, MWNTs- NH_2 对 SO_2 的灵敏度最高.

3 结论

利用介电泳技术在铬-银-金微电极上制备了 MWNTs, MWNTs- NH_2 , MWNTs-OH 和 MWNTs-COOH 4 种气体传感器, 室温下检测了气体传感器对不同浓度 SO_2 的气敏性能. 在介电泳力作用下本征 MWNTs 和不同基团修饰 MWNTs 的颗粒均被电极尖端捕获, MWNTs 颗粒发生了正介电泳(p-DEP). 传感器对 SO_2 的响应时间、恢复时间和灵敏度随 SO_2 气体浓度的增加而增大. 基团修饰 MWNTs 传感器对 SO_2 的灵敏度较本征 MWNTs 传感器的灵敏度显著提高, MWNTs- NH_2 传感器的灵敏度最高, 碳管与 SO_2 间的毛细力、表面张力、氢键、化学键等相互作用为影响传感器气敏性能的因素.

参考文献

- 1 Kong J, Franklin N R, Zhou C W, et al. Nanotube molecular wires as chemical sensors. *Science*, 2000, 287: 622–625
- 2 Varghese O K, Kichambre P D, Gong D, et al. Gas sensing characteristic of multi-wall carbon nanotubes. *Sens Actuat B*, 2001, 81: 32–41
- 3 Xu K, Tian X J, Wu C D, et al. Study on the large-scale assembly and fabrication method for SWCNTs nano device. *Sci China-Phys Mech*

Astron, 2013, 56: 556–561

- 4 Suehiro J, Zhou G B, Hara M. Fabrication of a carbon nanotube-based gas sensor using dielectrophoresis and its application for ammonia detection by impedance spectroscopy. *J Phys D-Appl Phys*, 2003, 36: L109–L114
- 5 Cheng Y W, Yang Z, Wei H, et al. Progress in carbon nanotube gas sensor research (in Chinese). *Acta Phys Chim Sin*, 2010, 26: 3127–3142 [程应武, 杨志, 魏浩, 等. 碳纳米管气体传感器研究进展. *物理化学学报*, 2010, 26: 3127–3142]
- 6 Li J, Lu Y J, Ye Q, et al. Carbon nanotube sensors for gas and organic vapour detection. *Nano Lett*, 2003, 3: 929–933
- 7 Qi P F, Vermesh O, Grecu M, et al. Toward large arrays of multiplex functionalized carbon nanotube sensors for highly sensitive and selective molecular detection. *Nano Lett*, 2003, 3: 347–351
- 8 Kang H, Lim S, Park N, et al. Improving the sensitivity of carbon nanotube sensors by benzene functionalization. *Sens Actuat B*, 2010, 147: 316–321
- 9 Ong K G, Zeng K F, Grimes C A. A wireless passive carbon nanotube based gas sensor. *IEEE Sens J*, 2002, 2: 82–88
- 10 Leghrib R, Pavelko R, Felten A, et al. Gas sensors based on multiwall carbon nanotubes decorated with tin oxide nanoclusters. *Sens Actuat B*, 2010, 145: 411–416
- 11 Niu L, Luo Y L, Li Z Q. A highly selective chemical gas sensor based on functionalization of multi-walled carbon nanotubes with poly (ethylene glycol). *Sens Actuat B*, 2007, 126: 361–367
- 12 Dhall S, Jaggi N, Nathawat R. Functionalized multiwalled carbon nanotubes based hydrogen gas sensor. *Sens Actuat A*, 2013, 201: 321–327
- 13 Xie H F, Sheng C H, Chen X, et al. Multi-wall carbon nanotube gas sensors modified with amino-group to detect low concentration of formaldehyde. *Sens Actuat B*, 2012, 168: 34–38
- 14 Suehiro J, Imakiire H, Hidaka S I, et al. Schottky-type response of carbon nanotube NO₂ gas sensor fabricated onto aluminum electrodes by dielectrophoresis. *Sens Actuat B*, 2006, 114: 943–949
- 15 Suehiro J, Zhou G B, Imakiire H, et al. Controlled fabrication of carbon nanotube NO₂ gas sensor using dielectrophoretic impedance measurement. *Sens Actuat B*, 2005, 108: 398–403
- 16 Lucci M, Regoliosi P, Reale A, et al. Gas sensing using single wall carbon nanotubes ordered with dielectrophoresis. *Sens Actuat B*, 2005, 112: 181–186
- 17 Jian J M, Guo X S, Lin L W, et al. Gas-sensing characteristics of dielectrophoretically assembled composite film of oxygen plasma-treated SWCNTs and PEDOT/PSS polymer. *Sens Actuat B*, 2013, 178: 279–288
- 18 Suehiro J, Zhou G B, Hara M. Detection of partial discharge in SF₆ gas using a carbon nanotube-based gas sensor. *Sens Actuat B*, 2005, 105: 164–169
- 19 Mathieu Y, Tzanis L, Souldard M, et al. Adsorption of SO_x by oxide materials: A review. *Fuel Process Technol*, 2013, 114: 81–100
- 20 Cantalini C, Valentini L, Lozzi L, et al. NO₂ gas sensitivity of carbon nanotubes obtained by plasma enhanced chemical vapor deposition. *Sens Actuat B*, 2003, 93: 333–337

The gas sensing performances of gas sensors based on the dielectrophoretically manipulated multi-wall carbon nanotubes with various functionalized groups towards SO₂

FENG LiLi^{1*}, WANG HaiBo¹ & CHEN HuiYing^{2*}

¹ Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment of Ministry of Education, Beijing Climate Change Response Research and Education Center, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

² College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081, China

Gas sensors based on pristine multi-wall carbon nanotubes (MWNTs) and functionalized multi-wall carbon nanotubes (MWNTs-x, x: NH₂, OH, COOH) were fabricated on the chromium-silver-gold microelectrode chips by dielectrophoresis process. The dielectric response behavior of MWNTs and MWNTs-x were investigated. The electrophoresis parameters of 2 MHz and 8 V were determined as the fabrication condition of MWNTs gas sensors. The particles of MWNTs and MWNTs-x were captured to the electrode tip under the dielectrophoretic force, which was the positive dielectrophoresis (p-DEP). The gas sensing performances of the fabricated gas sensors towards different concentrations of SO₂ were tested at room temperature. It was found that the response time, recovery time and sensitivity of gas sensors towards SO₂ were increased with the increase of SO₂ concentrations. The functionalized MWNTs gas sensors showed remarkably higher sensitivity than pristine MWNTs gas sensors. The sensitivity of the aminoated MWNTs (MWNTs-NH₂) gas sensors was the highest and 17–23 times higher than that of pristine MWNTs. We conclude that the interactions between carbon tubes and SO₂ such as capillary forces, surface tensions, hydrogen bonding and chemical bonds are influential factors for the gas sensing performances of these gas sensors.

dielectrophoretical manipulation, multi-wall carbon nanotubes, functional group modification, gas sensors, sulfur dioxide

PACS: 81.07.De, 81.05.U-, 81.05.Rm, 82.47.Rs

doi: 10.1360/SSPMA2015-00165