文章编号: 1007 - 4252(2021)01 - 0001 - 008

丙酮气敏传感材料的研究进展

宋振林,周仕强,张 瑾,柳清菊*
(云南大学 材料与能源学院,云南省微纳材料与技术重点实验室,昆明 650091)

摘要: 丙酮是一种有毒有害的有机气体,广泛存在于工业生产及家居生活中,同时也是糖尿病的诊断物之一,因此准确实时的丙酮检测手段是安全生产和人体健康所迫切需要的。金属氧化物半导体气体传感器具有灵敏度高、成本低、可靠性高等优点,在有毒有害气体检测领域应用广泛。本文综述了近年来丙酮气敏传感材料的研究进展,对气敏材料的结构与形貌、气敏机理与改性手段等方面进行了介绍,分析了其研究现状以及未来的发展趋势。

关键词: 丙酮; 糖尿病; 金属氧化物; 气体传感器; 气敏改性
中图分类号: X502 **文献标志码:** A

Research progress of acetone gas sensing materials

SONG Zhen-lin, ZHOU Shi-qiang, ZHANG Jin, LIU Qing-ju*
(School of Materials and Energy, Yunnan University, Key Laboratory of Micro-Nano Materials and Technology, Kunming 650091, China)

Abstract: Acetone is a toxic and harmful organic gas which is widely used in industrial production and household life, and it is also one of the diagnostics of diabetes. Therefore, accurate and real-time acetone detection methods is urgent for safety production and human health. Metal oxide semiconductor gas sensors have advantages of high sensitivity, low cost, and high reliability, and are widely used in the field of toxic and harmful gas detection. In this paper, the research progress of acetone gas-sensing materials in recent years is reviewed, the structure and morphology of gas-sensing materials, gas-sensing mechanism and modification methods are introduced, and its research status and future development trends are also analyzed.

Key words: Acetone; Diabetes; Metal oxide; Gas sensor; Modification

收稿日期: 2021-01-21; **修订日期:** 2021-02-03
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51562038); 云南省自然科学基金重点资助项目(2018FY001-011).
作者简介: 宋振林(1997-),男,硕士,主要研究方向为传感材料与器件(E-mail: zlsong@mail.ynu.edu.cn).
通信作者: 柳清菊(1966-),女,博士,教授(二级),主要研究方向为纳米功能材料的研究及应用开发(E-mail: qjliu@ynu.edu.cn).

0　引言

丙酮常温下为无色液体，具有刺鼻气味，是一种常用的工业有机溶剂，广泛存在于工业生产及家居生活中。当丙酮浓度高于 173 ppm 时会导致乏力、恶心，严重者出现呕吐、昏迷甚至神经中枢中毒症状，长期接触会导致咽喉炎、皮炎和肝肾受损，严重危害人体健康[1-2]。糖尿病人呼出气体中，丙酮的含量大于 1.8 ppm，高于正常人两倍以上，因此丙酮可作为检测糖尿病的诊断物之一。根据国务院 2019 年印发的《健康中国行动》，我国成年人糖尿病患病率快速上升，据估算，目前我国糖尿病患者超 9 700万，糖尿病前期人群约 1.5 亿。受糖尿病影响的人数近年来急剧增加使之成为世界范围内主要的疾病之一[3]。实现对丙酮气体的实时有效监测，对安全生产和人体健康特别是糖尿病的防治有极其重要的意义[4-5]。

目前丙酮检测方法主要有分光光度计法[6-7]、电化学法、气相色谱法[8]等。气相色谱法能准确检测丙酮含量，但所需设备较为昂贵，体积大，操作复杂，使用不便，难以实现实时监测和大规模普及应用。体积小、成本低的气体传感器是监测有机气体的一种常用方法[9-11]，其中金属氧化物传感器具有灵敏度高、工艺简单、可靠性高、成本低廉等优点[12-13]，从而受到普遍关注和重点研究，具有广泛的应用前景。

不同材料和结构制备的传感材料的气敏性能有很大差异，本文以二元和多元及复合氧化物为分类标准，综述近年来丙酮气敏传感材料的制备工艺和改性手段，总结了气敏响应机理，并分析其研究现状及未来的发展趋势。

1　氧化物丙酮气敏传感材料分类及研究进展

1.1　二元氧化物气敏传感材料

金属氧化物半导体传感器的研究已逾半世纪，在气敏材料的机理、改性研究和应用等方面取得了很大的进展[14-16]。常见的二元气敏氧化物有 ZnO、In_2O_3、SnO_2、Co_3O_4等，因导电形式的不同分为以电子导电为主的 N 型氧化物半导体和以空穴导电为主的 P 型氧化物半导体。

1.1.1 N 型氧化物半导体气敏传感材料

丙酮气敏传感材料研究最常用的 N 型氧化物之一是 ZnO。ZnO 是表面电阻控制型半导体金属氧化物，具有热稳定性好，导电迁移率高的特点，能够对多种有害气体尤其是挥发性有机物(VOCs) 产生较好的气敏响应。Li 等[17]采用快速沉淀法合成了纳米 ZnO，主要暴露非极性的(100) 晶面，高能晶面具有更高的表面能和更多的缺陷位，表面缺陷含量的增加使气敏性能得到提升，在 300 ℃温度条件下对 1 000 ppm 丙酮响应为 8.0，且最低检测限为 5 ppm。Ge 等[18]制备了 ZnO 纳米微球，具有三维分层多孔结构。在 330 ℃时，对 100 ppm 丙酮气体的响应恢复时间分别为 11 s 和 17 s。其他 N 型氧化物如 SnO_2等也有大量报道，Zhao 等[19]采用化学合成法制备了介孔 SnO_2传感器，介孔结构提供了更多的反应活性位点，使气敏反应在内外表面同时进行，也有助于丙酮分子的吸附和扩散。经 550 ℃煅烧后的传感器对 100 ppm 丙酮在 225 ℃温度下响应最大，为 62。对于纯相材料，主要通过暴露高能晶面、制备多孔及介孔结构以提供更多氧空位，从而促进气敏反应的进行。

纯相的金属氧化物气敏传感材料的气敏性能往往较弱，而且工作温度较高，限制了其使用。目前的研究主要聚焦于气敏材料的改性，主要采用掺杂、负载以及合成不同的形貌结构等方法对纯相材料进行改性。Wongrat 等[20]采用直流脉冲溅射将 Pt、Nb 负载于线状纳米 ZnO 上，Pt 修饰使吸附氧浓度增加，Nb 修饰形成 n-n 异质结。Pt 和 Nb 修饰的 ZnO 传感器对 1 000 ppm 丙酮的响应有了较大提高，分别为 188 和 224。Karmaoui 等[21]采用无水溶胶-凝胶法合成了颗粒状 Pt@ In_2O_3纳米结构，掺杂 2 wt%Pt 的传感器在 150 ℃温度下对 1.56 ppm 丙酮气体响应约为 18，且最低检测限达 10 ppb。Yang 等[22]制备了 Ag 修饰的 B-TiO_2，在最佳工作温度 250 ℃时对 50 ppm 丙酮的响应达 68.19，且最低检测限降低为 887 ppb，气敏机理及响应如图 1 所示。掺杂和负载贵金属能有效提高气体响应，主要有以下几个方面: (1) 增加气体吸附容量，使更多的氧离子和目标气体吸附，并降低吸附活化能; (2) 载流子的重新分布，使能带弯曲形成肖特基势垒，材料导带的电子转移到贵金属粒子上，形成界面偶极子层[23]，阻止了分离的电子—空穴对的复合，影响了电子的流动;

(3) 溢出效应降低了反应活化能,气体吸附在贵金属团簇上,分解产生活性原子迁移到材料表面,加速了化学吸附。

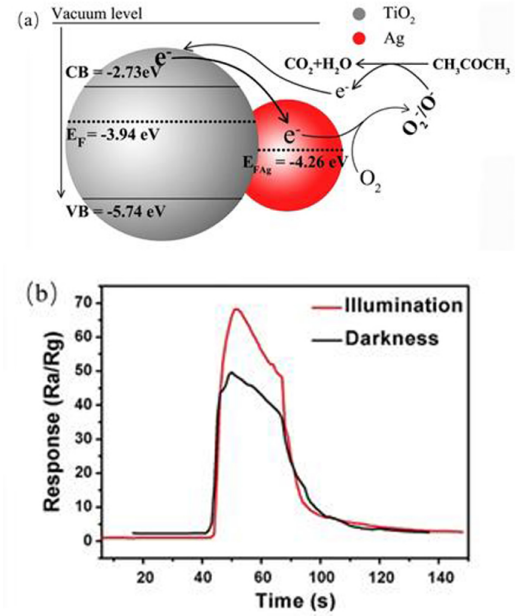

图 1 (a) TiO_2纳米颗粒的载流子浓度和迁移率; (b) B-TiO2@ Ag 在气体浓度为 50 ppm、工作温度为 250 ℃光照和黑暗环境下的丙酮响应[23]

Fig. 1 (a) The carrier concentration and mobility of all three kinds of TiO_2 nanoparticles; (b) The response of as-prepared B-TiO_2 @ Ag under illumination and darkness environments where the gas concentration and operating temperature are 50 ppm and 250 ℃, respectively

贵金属成本较高,不利于商业化推广,故也有大量研究聚焦于非贵金属掺杂。Xu 等[24] 采用静电纺丝技术合成了不同 La 掺杂量的水滴状 ZnO 纳米纤维,当 La 掺杂量为 1.0 wt% 时在 340 ℃温度下对 200 ppm 丙酮响应为 64,响应恢复时间分别为 16 s 和 8 s,且具有良好的选择性和稳定性。Jin 等[25] 制备了 Cu 掺杂纳米花状 SnO_2传感器,对丙酮有优异的选择性,且在 260 ℃温度下对 50 ppm 丙酮气体响应恢复时间分别为 9 s 和 6 s。Ding 等[26] 通过水热法合成了 Cr 掺杂的的 WO_3传感器,在 250 ℃温度下对 100 ppm 丙酮的响应为 71.12,最低检测限 298 ppb,并表现出优异的重复性。掺杂非贵金属可以改变材料的晶粒尺寸、能带结构、孔隙率和比表面积,从而提高气敏性能。在大多数情况下,掺杂原子的引入导致晶粒尺寸的减小,当晶粒尺寸小于德拜长度的两倍时,电子耗尽层将占据整个晶粒,因此提高了气敏性能。能带结构的变化导致电导率改变,费米能级升高,孔隙率和比表面积的增加提供了更多的吸附位,这些都使得材料表现出更高的气敏响应。

也有研究直接通过原料及工艺改进对气敏材料进行形貌控制。Tian 等[27] 制备了多孔咪唑沸石包覆的中空纤维 ZnO 纳米结构,空心结构的 ZnO@ ZIF-8 在 63 ℃时对 100 ppm 的丙酮响应为 60,远高于非空心结构。Yan 等[28] 以 HF 作为形态控制剂,采用水热法制备 N-GRO / TiO_2,在 270 ℃温度下,对 100 ppm 丙酮响应为 10,且选择性良好。Jia 等[29] 通过溶剂热法制备了花状 α-Fe_2O_3 / MWCNTs 纳米结构,对 50 ppm 丙酮的响应在 220 ℃时为 20.32,是纯 α-Fe_2O_3的 3.49 倍,且响应时间更短为 2.3 s。通过形貌控制使材料的比表面积提高,为气敏反应提供了更多的吸附位点,使反应更为活跃。

1.1.2 P 型氧化物半导体气敏传感材料

P 型金属氧化物半导体如 Co_3O_4和 NiO 等作为气敏材料得到了广泛的研究。Lin 等[30] 制备了单晶片状 Co_3O_4,暴露其(111) 高能晶面,在 160 ℃温度下对 100 ppm 丙酮的响应为 6.1。Zhou 等[31] 制备了均匀的立方状 Co_3O_4纳米结构,并通过控制反应物的初始量合成球形 Co_3O_4,其中立方 Co_3O_4气敏性能更优异,在 240 ℃温度下对 500 ppm 丙酮响应为 4.88,响应和恢复时间分别为 2 s、5 s。Zhang 等[32] 合成了 Co_3O_4交叉纳米片阵列,在 111 ℃温度下对 1 000 ppm 丙酮的响应达 36.5。从气体吸附和电子传递的方面看,高能晶面悬垂键密度较高[33],拥有不饱和氧配位。当气敏反应开始时,这些位置将成为吸附氧离子和目标气体的良好位点。同时气体与高能晶面之间的电荷转移量更大[34],如图 2 所示,电子相互作用更强,从而表现出更快和更高的气敏响应。

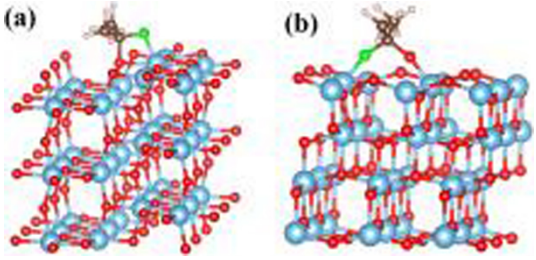

图 2 锐钛矿型 TiO_2 的(a) (010) 面和(b) (001) 面上的丙酮分子的最佳吸附构型[34]

Fig. 2 Optimized adsorption configuration of an acetone molecule on (a) (010) facets and (b) (001) facets of anatase TiO_2

Akamatsu 等[35] 制备了掺杂 Pt 和 Pd 的 Co_3O_4

纳米颗粒，在 200 ℃温度下，Pt 掺杂传感器对 5 ppm 丙酮的响应为 18.7，同样条件的 Pd 掺杂传感器的响应为 31.5。Wang 等[36] 采用无模板水热法合成 W 掺杂 NiO 空心球，为分层花状结构，比表面积增加，同时晶粒尺寸减小。结果表明: W 掺杂量为 4.0 wt%的传感器在在最佳工作温度为 250 ℃时对 100 ppm 丙酮气体响应为 198.1。

基于二元氧化物气敏性能的总结如表 1 所示。

表 1　二元氧化物丙酮传感材料的气敏性能

Table 1 Gas sensitivity of binaryoxide acetone sensing material

材料	气体浓度/ppm	最佳工作温度/℃	响应值	形貌结构	参考文献
SnO_2	100	225	62	介孔结构	[19]
Pt@ In_2O_3	1.56	150	18	亚球形	[21]
Ag@ B-TiO_2	50	250	68.19	堆叠山状结构	[22]
La@ ZnO	200	340	64	纳米球形	[24]
ZnO@ ZIF-8	100	63	60	空心结构	[27]
W@ NiO	100	250	198.1	分层花状空心球	[36]

通过以上综述可以发现，现有研究通过不同的元素掺杂或特殊的结构设计对二元氧化物基体进行改性，从而提高了传感器的灵敏度及响应速度，或是降低了工作温度和检测限。但二元氧化物本身的理化性质较单一，稳定性和可重复性不理想，进而影响了丙酮气体传感器的应用和市场化。

1.2　多元及复合氧化物气敏传感材料

多元及复合氧化物传气敏传感材料种类更广泛，相较于二元氧化物，复合多相材料可以形成异质结，实现材料之间的优势互补，以达到改善气敏性能的目的。

1.2.1 多元氧化物气敏传感材料

多元氧化物气敏传感材料大量研究聚焦于合成多孔及介孔结构及掺杂改性。Zhang 等[37] 报道了一步溶剂热法合成超细多孔 $NiFe_2O_4$微球，在 250 ℃时对 100 ppm 丙酮响应为 27.4，具有响应快 (2 s) 、低检测限(200 ppb) 和较高选择性。Jia 等[38] 采用自组装法制备了介孔 $NiFe_2O_4$，在 210 ℃时对 200 ppm 丙酮的响应为 57，响应(44 s) 和恢复(24 s) ，并具有出色的选择性和长期稳定性。采用多元氧化物合成的材料形貌更多样化，往往能得到更高的选择性，这些研究可以为下一步制备纳米结构提供有益指导。Li 等[39] 合成了 Pd 掺杂的 $ZnFe_2O_4$大孔球，在275 ℃时，掺 0.5 wt% PdO 的传感器对 100 ppm 丙酮响应为 18.9，同时具有出色的选择性和良好长期稳定性。Rong 等[40] 利用微波辅助溶胶—凝胶法，用 Ag-$LaFeO_3$和多壁碳纳米管(CNTs) 分子印迹聚合物制备了高性能丙酮传感器，形成 p-p 结，并提高了导带的电子密度。0.75 wt% CNTs 在 86 ℃工作温度下对 5 ppm 丙酮响应达 59，且有良好的选择性。Hao 等[41] 通过一步水热法合成了掺 Ni 的 $LaFeO_3$多孔微球，其微观形貌和能谱如图 3 所示。

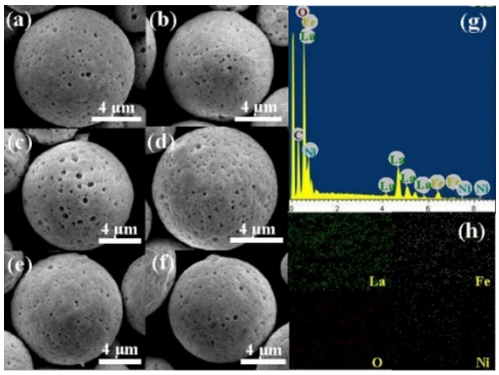

图 3　掺 Ni 的 $LaFeO_3$多孔微球微观形貌及能谱图

Fig. 3 The SEM images of a-f $LaFe_{1-x}Ni_xO_3$, the EDS elemental mapping images

最佳温度下降了 50 ℃，对 100 ppm 丙酮的响应为 82.75; 具备很高的稳定性，对丙酮气体的选择性较高。值得一提的是，有研究关注光照对材料气敏性能的影响: Zhang 等[42] 研究了紫外线照射对

$LaFeO_3$纳米晶体丙酮气敏性能的影响，发现在 365 nm 紫外线照射时，传感器对 10 ppm 丙酮的响应为 14.1，相较于未光照情况提高了 2 倍，且最佳工作温度降至 170 ℃。

1.2.2 复合氧化物气敏传感材料

两种材料复合时因其性质的差异，在界面处产生异质结，可促进载流子迁移提升气敏性能: Min 等[43] 利用(p)-Co_3O_4修饰了(n)-ZnO 形成 p-n 异质结，在 250 ℃ 温度下对 10 ppm 丙酮的响应为 43.86。Qi 等[44] 合成了 ZnO@ Co_3O_4异质结，由于表面增加的氧空位浓度等，在 180 ℃ 温度下对 100 ppm 丙酮的响应达 63.7，相较于纯 ZnO 和 Co_3O_4传感器有大幅提高。异质结可以通过结合两种及以上的金属氧化物材料来实现优势互补，如提升催化活性，增加电子耗尽层的收缩幅度，提供更多吸附位点和改变能带结构，从而提升气敏性能。两种材料之间的功能差异，使得为了维持系统的平衡，发生电子或空穴的运动，从而放大了电信号的变化量。Park 等[45] 通过一步热蒸发过程合成了 TeO_2修饰线状 In_2O_3纳米结构，In_2O_3纳米线的直径在 10 nm - 20 nm 之间，长度可达 100 μm，在 300 ℃ 温度下对 200 ppm 浓度的丙酮响应 24.87，响应和恢复时间分别为5 s、225 s。Lee 等[46] 制备了 ZnO@ CuO 空心纳米结构，在 200 ℃ 温度下对 1 ppm 丙酮响应达 11.14，最低检测限达 40 ppb，且稳定性长达 40 天。具有不同特点的多元及复合氧化物半导体传感材料的气敏性能如表 2 所示。

表 2 多元及复合氧化物丙酮传感材料的气敏性能

Table 2 Gas sensitivity of multi-element and composite oxide acetone sensing material

材料	气体浓度/ppm	最佳工作温度/℃	响应值	形貌结构	参考文献
$NiFe_2O_4$	200	210	57	介孔结构	[38]
Pd@ $ZnFe_2O_4$	100	275	18.9	大孔球状	[39]
Co_3O_4@ ZnO	10	250	43.86	异质结	[43]
TeO_2@ In_2O_3	200	300	24.87	纳米线结构	[45]
ZnO@ CuO	1	200	11.4	空心结构	[46]

根据以上研究进行对比发现，多元及复合氧化物传感器与二元氧化物相比通常具有更高的稳定性和可靠性，也因多元的材料性能展现出更丰富的气敏特性，如高响应、低工作温度、高选择性等。但在低检测限方面却往往不及二元氧化物传感器。气体传感器能否实用化，特别是可穿戴设备领域，传感材料在室温和低检测限下的准确性和稳定性是重要考虑因素，同时也要考虑与柔性基底结合，制备可穿戴监测设备。因此对上述氧化物体系传感器需进一步研究。

2 气敏响应机理

金属氧化物的气敏机理较复杂，目前有几种理论解释，最常用的是表面电阻控制模型。气敏材料[47] (以 n 型半导体为例) 表面暴露于空气中时，材料与氧分子发生化学吸附，氧分子捕获材料导带中的电子形成 O^-、O^{2-}、O_{2-}等氧物种，使得气敏材料发生价态变化，晶粒间的势垒发生变化，从而使电子密度下降，电阻上升，电导呈整体下降，这个过程如(2.1-3) 所示:

$$O_{2,gas} \rightarrow O_{2,ads} \quad (2.1)$$

$$O_{2,ads} + e^- \rightarrow O_{2,ads-} \quad (2.2)$$

$$O_{2,ads-} + e^- \rightarrow 2O_{ads-} \quad (2.3)$$

气敏机理如图 4 所示，丙酮为还原性气体，当敏感材料接触到丙酮气体时，出现气体的扩散和吸附，氧离子与丙酮气体反应，释放捕获的电子回到材料的导带，因此传感器的电阻下降，反应如(2.4) 所示。

$$CH_3COCH_3 + 8O_{ads} \rightarrow 3CO_2 + 3H_2O + 8e^- \quad (2.4)$$

3 丙酮柔性传感器件

针对呼吸丙酮等实时监测需求，非柔性传感器难以应用于可穿戴设备领域。柔性传感器具有可弯

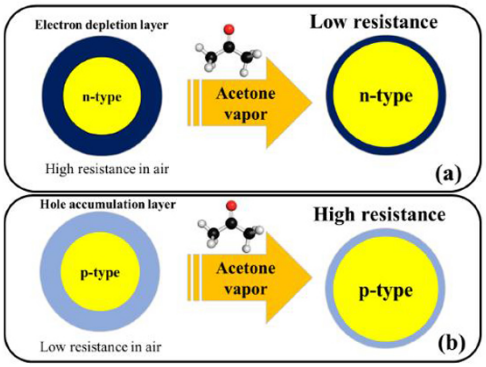

图 4　(a) n 型金属氧化物和(b) p 型金属氧化物中丙酮气敏机理的示意图[47]

Fig. 4 Schematic illustration of acetone sensing mechanism in (a) n-type metal oxides and (b) p-type metal oxides

曲[48]、便于携带和生物相容性好等特点，是可穿戴气体监测设备领域必须要突破的关键技术[49-50]。Yuan 等[51]利用静电纺丝技术制备了 3D-M 框架的柔性丙酮传感器，具有高度互连的多孔结构，检测限下降到 50 ppb，且保持 1 000 个弯曲周期性能没有下降。Young 等[52]采用 Au 纳米颗粒吸附制备了碳纳米管丙酮柔性传感器，在室温下对 800 ppm 丙酮的响应相较于未吸附 Au 的传感器提升三倍，达4.5。Andrysiewicz 等[53]制备了 CuO 覆盖的 Al_2O_3 柔性基底，在 150 ℃温度下对丙酮的检测限达 0.05 ppm，且有良好的机械稳定性。但目前柔性传感器的气敏性能还远不能满足人们的要求，需要在关注柔性基底和气敏传感材料柔韧性和均匀性的同时继续提升柔性传感器的气敏性能。

4　结论

综上所述，丙酮气敏传感材料的研究在高响应、高选择性、高稳定性、低工作温度、低检测限和低成本方面都取得了一定的进展，但气体传感器的商业化程度仍不够，目前研究报道的气敏性能尚无法满足呼吸丙酮商业化监测要求。在气敏机理及改性手段方面，现有研究也并不成熟，尚未形成一个统一的理论去解释丙酮气体与各种气敏传感材料表面发生的相关复杂理化反应，制约着行业的进一步发展。研究大规模制备性能稳定的传感器生产工艺，是该领域要实现商业化必须解决的突出问题。

丙酮气敏传感材料下一阶段的研究重点包括两个方面: 其一是进一步提高丙酮气敏性能，包括高灵敏度、高选择性、高稳定性、低工作温度和快速响应等; 其二是丙酮气敏材料及器件的柔性化设计及制备，使其实现可穿戴、实时、准确检测呼吸气体中丙酮浓度的功能，满足糖尿病患者的需求。

参考文献:

[1] Lian X, Li Y, Tong X, et al. Synthesis of Ce-doped SnO_2 nanoparticles and their aceto-ne gas sensing properties [J]. Applied Surface Science, 2017, 407: 447-455.

[2] Cheng L, Ma S Y, Wang T T, et al. Synthesis and enhanced acetone sensing properties of 3D porous flower-like SnO_2 nanostructures [J]. Materials Letters, 2015, 143: 84-87.

[3] Maryamsadat S, Stella Q. Review of Non-invasive Glucose Sensing Techniques: Optical, Electrical and Breath Acetone [J]. Sensors, 2020, 20 (5) .

[4] Chuang M Y, Lin Y T, Tung T W, et al. Room-temperature-operated organic-based acetone gas sensor for breath analysis [J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2018, 260: 593-600.

[5] Li Y J, Zhang M, Zhang H M. Acetone sensors for non-invasive diagnosis of diabetes based on metal-oxide-semiconductor materials [J]. Chinese Physics B, 2020, 29 (9) : 090702.

[6] Joseph R W, Dalila M, Geoffrey D S. A UV - Vis Photoacoustic Spectrophotometer [J]. Analytical Chemistry, 2014, 86 (12) : 6049-6056.

[7] Khan S B, Faisal M, Rahman M M, et al, A Low-temperature growth of ZnO nanoparticles: Photocatalyst and acetone sensor [J]. Talanta - Oxford Then Amsterdam, 2011, 85 (2) : 943-949.

[8] Deng C, Zhang J, Yu X, et al. Determination of acetone in human breath by gas chromatography-mass spectrometry and solid-phase microextraction with on-fiber derivatization [J]. Journal of Chromatogr B, 2004, 810 (2) .

[9] Sonia F, Aleksei V E, Ivan I B, et al. Development of a Sensing Array for Human Breath Analysis Based on SWCNT Layers Functionalized with Semiconductor Organic Molecules [J]. Advanced Healthcare Materials, 2020, 9 (12) .

[10] Vahid A, Hossein R, Ali M, et al. Nanostructured Metal Oxide-Based Acetone Gas Sensors: A Review [J]. Sensors, 2020, 20 (11) .

[11] Liu W, Sun J, Xu L, et al. Understanding the noble metal modifying effect on In_2O_3 nanowires: Highly sensitive and

selective gas sensors for potential early screening of multiple diseases [J]. Nanoscale Horizons, 2019, 4 (6): 1361-1371.

[12] Manjula M, Karthikeyan B, Sastikumar D. Sensing characteristics of nanocrystalline bismuth oxide clad-modified fiber optic gas sensor [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 95: 78-82.

[13] Wang T Y, Li Y Y, Li T T, et al. Enhanced NOx gas sensing properties of Cr_2O_3 film modified ordered porous ZnO gas sensors [J]. Solid State Ionics, 2018, 326 (1): 173-182.

[14] Ananya D. Semiconductor metal oxide gas sensors: A review [J]. Materials Science & Engineering B, 2018, 229: 206-217.

[15] Lin T, Lv X, Li S, et al. The Morphologies of the Semiconductor Oxides and Their Gas-Sensing Properties [J]. Sensors 2017, 17, 2779.

[16] Mirzaei A, Jae H K, Hyoun W K, et al. Resistive-based gas sensors for detection of benzene, toluene and xylene (BTX) gases: a review [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2018, 6 (16): 4342-4370.

[17] Li S M, Zhang L X, Zhu M Y, et al. Acetone sensing of ZnO nanosheets synthesized using room-temperature precipitation [J]. Sensors and Actuators, B: Chemical, 2017, 249: 611-623.

[18] Ge M Y, Xuan T M, Yin G L. Controllable synthesis of hierarchical assembled porous ZnO microspheres for acetone gas sensor [J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2015, 220: 356-361.

[19] Zhao J, Xu H, Yu X, et al. Detection of low concentration acetone utilizing semiconductor gas sensor [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2020, 31 (7): 5478-5484.

[20] Ekasiddh W, Narong C, Channarong C, et al. Acetone gas sensors based on ZnO nanostructures decorated with Pt and Nb [J]. Ceramics International, 2017, 43: S557-S566.

[21] Karmaoui M, Leonardi S G, Latino M, et al. Pt-decorated In_2O_3 nanoparticles and their ability as a highly sensitive (< 10 ppb) acetone sensor for biomedical applications [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 230: 697-705.

[22] Yang W Y, Shen H L, Min H H, et al. Enhanced acetone sensing performance in black TiO_2 by Ag modification [J]. Journal of Materials Science, 2020, 55 (24): 10399-10411.

[23] Yang X, Fu H, Tian Y, et al. Au decorated In_2O_3 hollow nanospheres: A novel sensing material toward amine [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2019, 296, 126696.

[24] Xu X L, Chen Y, Ma SY, et al. Excellent acetone sensor of La-doped ZnO nanofibers with unique bead-like structures [J]. Sensors & Actuators B: Chemical, 2015, 213: 222-233.

[25] Jin W X, Ma S Y, Tie Z Z. One-step synthesis and highly gas-sensing properties of hierarchical Cu-doped SnO_2 nanoflowers [J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2015, 213: 171-180.

[26] Ding Q L, Wang Y R, Guo P Q, et al. Cr-Doped Urchin-Like WO_3 Hollow Spheres: The Cooperative Modulation of Crystal Growth and Energy-Band Structure for High-Sensitive Acetone Detection [J]. Sensors, 2020, 20 (3473): 3473.

[27] Tian L, Sun Y X, Huang H L, et al. Porous ZIF-8 Thin Layer Coating on ZnO Hollow Nanofibers for Enhanced Acetone Sensing [J]. Chemistry Select, 2020, 5 (8): 2401-2407.

[28] Yan W Y, Zhou Q, Chen X, et al. C-doped and N-doped reduced graphene oxide / TiO_2 composites with exposed (001) and (101) facets controllably synthesized by a hydrothermal route and their gas sensing characteristics [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 230: 761-772.

[29] Jia X H, Cheng C D, Yu S W, et al. Preparation and enhanced acetone sensing properties of flower-like α-Fe_2O_3 / multi-walled carbon nanotube nanocomposites [J]. Sensors & Actuators B: Chemical, 2019, 300.

[30] Lin Y L, Ji H M, Shen Z R, et al. Enhanced acetone sensing properties of Co_3O_4 nanosheets with highly exposed (111) planes [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2016, 27 (2): 2086-2095.

[31] Zhou T, Zhang T, Deng J, et al. P-type Co_3O_4 nanomaterials-based gas sensor: Preparation and acetone sensing performance [J]. Sensors and Actuators, B: Chemical, 2017, 242: 369-377.

[32] Zhang Z Y, Zhu L P, Wen Z, et al. Controllable synthesis of Co_3O_4 crossed nanosheet arrays toward an acetone gas sensor [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 238: 1052-1059.

[33] Gao X, Zhang T. An overview: Facet-dependent metal oxide semiconductor gas sensors [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 277, 604 - 633.

[34] Liang Y, Yang Y, Zhou H, et al. A systematic study onthe crystal facets-dependent gas sensing properties of anatase TiO_2 with designed {010}, {101} and {001} facets [J]. Ceramics International, 2019, 45 (5): 6282-6290.

[35] Takafumi A, Toshio I, Yoshitake M, et al. Gas sensor properties of nanopore-bearing Co_3O_4 particles containing Pt or Pd particles [J]. Journal of Asian Ceramic Societies, 2020, 0: 1-11.

[36] Wang C, Liu J Y, Yang Q Y. Ultrasensitive and low detection limit of acetone gas sensor based on W-doped NiO hierarchical nanostructure [J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2015, 220: 59-67.

[37] Zhang S F, Jiang W H, Li Y W, et al. Highly-sensitivity acetone sensors based on spinel-type oxide ($NiFe_2O_4$) through optimization of porous structure [J]. Sensors & Actuators B: Chemical, 2019, 291: 266-274.

[38] Jia C W, Zhang Y L, Kong Q, et al. Soft-template synthesis of mesoporous $NiFe_2O_4$ for highly sensitive acetone detection [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2020, 31 (8): 6000-6007.

[39] Lv L, Wang Y L, Cheng P F, et al. Ultrasonic spray pyrolysis synthesis of three-dimensional $ZnFe_2O_4$-based microporous spheres for excellent sensitive acetone gas sensor [J]. Sensors & Actuators B: Chemical, 2019, 297.

[40] Rong Q, Li K J, Wang C, et al. Enhanced performance of an acetone gas sensor based on Ag-$LaFeO_3$ molecular imprinted polymers and carbon nanotubes composite [J]. Nanotechnology 2020, 31.

[41] Hao P, Lin Z G, Song P, et al. Hydrothermal preparation and acetone-sensing properties of Ni-doped porous $LaFeO_3$ microspheres [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2020, 31 (9): 6679-6689.

[42] Zhang H, Qin H W, Gao C Y, et al. UV Light Illumination Can Improve the Sensing Properties of $LaFeO_3$ to Acetone Vapor [J]. Sensors, 2018, 18 (7): 1990.

[43] Sung K M, Hongseok K, Yonghyun N, et al. Fabrication of highly sensitive and selective acetone sensor using (p)-Co_3O_4 nanoparticle-decorated (n)-ZnO nanowires [J]. Thin Solid Films, 2020, 714: 138249.

[44] QiL L, Zhong C Y, Deng Z H, et al. Bacterial cellulose templated p-Co_3O_4 / n-ZnO nanocomposite with excellent VOCs response performance [J]. Chinese Journal of Chemical Physics, 2020 (4): 477-487.

[45] Park S, Kheel H, Su G J, et al. Single-step synthesis of InO nanowires decorated with TeO nanobeads and their acetone-sensing properties [J]. Applied Physics A: Materials Science & Processing, 2016, 122 (4): 1-6.

[46] Jae E L, Chan K L, Hyung J P, et al. ZnO-CuO Core-Hollow Cube Nanostructures for Highly Sensitive Acetone Gas Sensors at a PPB Level [J]. ACS applied materials & interfaces, 2020, 12 (31): 35688-35697.

[47] Vahid A, Hossein R, Ali M, et al. Nanostructured Metal Oxide-Based Acetone Gas Sensors: A Review [J]. Sensors, 2020, 20 (11).

[48] Lin Y J, Chen J Q, Mohammad M T, et al. Printable Fabrication of a Fully Integrated and Self-Powered Sensor System on Plastic Substrates [J]. Advanced materials, 2019, 31 (5).

[49] Andrysiewicz W, Krzeminski J, Marszalek K, et al. Flexible Gas Sensor Printed on Polymer Substrate for Acetone Detection in Portable Exhaled Breath Analyzers [J]. Proceedings, 2019, 14 (1): 40.

[50] Saleem K, Shawkat A, Amine B. Substrate Dependent Analysis of Printed Sensors for Detection of Volatile Organic Compounds [J]. IEEE Access, 2019, 7: 134047-134054.

[51] Yuan W, Yang K, Peng H, et al. A flexible VOCs sensor based on a 3D Mxene framework with a high sensing performance [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2018, 6 (37): 18116-18124.

[52] Young S J, Lin Z D. Acetone gas sensors composed of carbon nanotubes with adsorbed Au nanoparticles on plastic substrate [J]. Microsystem Technologies, 2018, 24 (10): 3973-3976.

[53] Andrysiewicz W, Krzeminski J, Skarżynski K, et al. Gas Sensor Printed on a Polymer Substrate for Sub-ppm Acetone Detection [J]. Electronic Materials Letters, 2020, 16 (2).