文章编号:1004-2474(2018)03-0407-05

# 超细纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 及其组装结构的可见光催化性能

闫晓乐,李朋伟

(太原理工大学 信息工程学院微纳系统研究中心 新型传感器和智能控制系统教育部重点实验室,山西 太原 030024)

摘 要:利用水热法成功地制备出超细氧化铁(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)纳米颗粒及其再组装纳米饼和纳米环结构。通过 X 线 衍射(XRD)仪、扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)、氮吸附(BET)和 UV-Vis 分别对样品的结构、形 貌、比表面积和光学性能进行了表征,结果表明超细 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米颗粒的平均直径约为Ø5.5 nm,比表面积高达 256.2 m<sup>2</sup> ·g<sup>-1</sup>。通过控制反应时间等实验条件,可将 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 超细纳米颗粒三维定向组装为饼状结构,经腐蚀镂空 可进一步演化为纳米环状结构。这些结构表面由超细纳米颗粒相互联结,能够提供大量的活性位点。可见光照射 下的罗丹明 B 光催化降解实验表明,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米饼状再组装结构具有优异的可见光催化活性,且性能稳定,易回 收。这些特性使得 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 超细纳米颗粒及其再组装结构材料在光催化领域具有较大的实用价值。

关键词:Fe2O3;水热法;超细纳米颗粒;自组装;可见光催化

**中图分类号:**TN384 文献标识码:A **DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2018.03.024

# Visible-light Photocatalytic Properties of Ultrafine Nano Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Its Assembly Structure

#### YAN Xiaole, LI Pengwei

(Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of Education, Micro-Nano System Research Center of College of Information Engineerin, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The ultrafine  $Fe_2O_3$  nanoparticles and their self-assembled nano-saucers and nano-rings were successfully prepared by a simple hydrothermal method. The structure, morphology, specific surface area and optical properties of the samples were characterized by XRD, SEM, TEM, BET and UV-Vis. The results showed that the average diameter of ultrafine  $Fe_2O_3$  nanoparticles was about  $\emptyset 5.5$  nm and the specific surface area was up to 256.2 m<sup>2</sup> • g<sup>-1</sup>. By controlling the reaction time and other experimental conditions, the prepared  $Fe_2O_3$  nanoparticles can be 3D directionally assembled into a saucer shape structure and further evolved into the nano-rings by etching. The surfaces of these structures were interconnected by ultrafine nanoparticles which can provide a large number of active sites for photocatalytic reaction. The photocatalytic degradation of Rhodamine B under visible light irradiation showed that the  $Fe_2O_3$  nano-saucers reassembled structure had the excellent visible photocatalytic activity, stable performance and easy to recovery. These characters make ultrafine  $Fe_2O_3$  nanoparticles and their reassembled structure materials have great practical value in the field of photocatalysis.

Key words: Fe2 O3; hydrothermal method; ultrafine nanoparticle; self-assemble; visible-light photocatalyst

0 引言

纳米材料具有独特的物理化学性质,其优势在 于具有表面效应,小尺寸效应等,在光催化领域引起 广泛关注。在不同的纳米材料中,氧化铁(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 因其在水中的化学稳定性、无毒性、丰富性和低成本 等优点,目前已广泛应用于催化剂、气体传感器、生物技术和电极材料等领域<sup>[1-4]</sup>。纳米氧化铁作为应 用最广泛的无机纳米材料之一,其物理和化学性质 不仅与其化学组成有关,还与其尺寸、形貌、裸露晶 面活性及分散性有关。为进一步提高纳米氧化铁材

收稿日期:2017-08-28

基金项目:中国国家自然科学基金资助项目(51205276);山西省高等学校科技创新项目(2016136);山西省研究生教育创新项目 (2017SY021和2017BY049)

**作者简介:**闫晓乐(1993-),女,内蒙古呼伦贝尔人,硕士生,主要从事氧化铁纳米材料的制备及性能的研究。通信作者:李朋伟(1981-), 男,副教授,博士,主要从事传感器敏感材料、微纳电子器件和嵌入式传感器系统的研究。E-mail:lipengwei@tyut.edu.cn。

料的催化、传感、生化应用等性能,具有高比表面积、 高活性裸露晶面的超细氧化铁纳米颗粒及其再组装 结构的可控制备一直都是该领域的研究热点<sup>[5-8]</sup>。

目前,关于超细氧化铁纳米颗粒及其再组装结 构的制备及性能表征方面已有较多报道。Ramos Guivar 等用共沉淀法制备出粒径为Ø12 nm 的氧化 铁纳米颗粒,并在其表面修饰纳米羟基磷灰石,使其 在生物应用方面具有较大的潜力<sup>[9]</sup>。Xiao 等采用 水热法制备出了粒径约Ø9 nm 的氧化铁纳米颗粒, 并使其均匀分布在纳米石墨烯表面,该纳米复合材 料可逆比容量达到 600 mA • h • g<sup>-1</sup>,作为锂离子 电池阳极材料表现出了优异的电化学性能<sup>[10]</sup>。Cai 等利用溶剂热法,通过控制 Fe(acac)。的水解反应, 制备出由粒径约为Ø20 nm 的小颗粒二维定向组装 的氧化铁纳米片,该材料表现出良好的可见光催化 活性[11]。综上所述,寻求一种成本低,制备工艺简 单的绿色化学方法来制备超细纳米氧化铁粒子及其 再组装结构不仅在学术上具有深远的意义,在工业 应用上也有广阔的应用前景。

本文利用简单的水热法成功制备出超细 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米颗粒及其再组装的纳米饼和纳米环结构。利用 X 线衍射(XRD)仪、扫描电子显微镜(SEM)、透射 电子显微镜(TEM)、氮吸附(BET)和 UV-Vis 对样 品进行了详细表征,并研究了所制备的纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对罗丹明 B 溶液的可见光催化降解性能。

#### 1 实验

#### 1.1 纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的制备

分别称取 0.324 g 的 FeCl<sub>3</sub> • 6H<sub>2</sub>O(0.02 mol/ L)和 0.023 g 的 NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> • 2H<sub>2</sub>O(2.5 mmol/L) 溶解在 60 mL 去离子水中。磁力搅拌 10 min 后,将 溶液转移到 100 mL 聚四氟乙烯高压釜中,放入烘 箱,230 ℃下加热 1.5 h。待反应结束后高压釜自然 冷却至室温,将反应溶液离心获取沉淀物,用蒸馏水 和无水乙醇洗涤数次,置于干燥箱中 60 ℃干燥 5 h, 得到超细氧化铁纳米颗粒。

#### 1.2 纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的表征方法

样品的 XRD 分析采用 X'Pert Pro MPD 型 X 线衍射仪测定。使用 SEM(JEOL JSM-7001F)和 TEM(JEOL 2100F,200 kV)表征 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米颗粒 的晶体结构和形貌。使用 TriStar 3000 型比表面积 测试仪分析光催化剂的比表面积。

#### 1.3 纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 活性测定

将 10 mg 纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂加入到罗丹明 B 溶

液(50 mL,0.02 mmol/L)中,放入黑暗环境中磁力搅 拌 1 h,以达到吸附平衡,然后加入 0.3 mL 过氧化氢 溶液(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,质量分数 30%),用 500 W 的氙灯(波长 分布范围 400~800 nm)在距离液面 45 cm 处照射。 使用滤光片(激埃特,GI-LP420,波长 $\lambda$ >420 nm)去 除光源中紫外光部分。在照射期间,通过外循环水进 行冷却(照射到样品上的光功率为 95 mW·mL<sup>-1</sup>), 每隔 0.5 h 取样并离心过滤,使用分光光度计(Shimadzu,3100UV-vis-NIR)测量其吸光度。

2 实验结果与讨论

#### 2.1 XRD 分析

图 1 为合成的超细 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米颗粒,纳米饼和 纳米环的 XRD 谱图。所有样品的衍射峰与赤铁矿 的 XRD 谱图( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, JCPDS 33-0664)一致,无其 他杂质的特征峰,表明制备的样品为纯的 $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。 超细 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米颗粒 XRD 衍射峰强度较弱,且半 峰全宽较大,这是由于晶粒细小所致<sup>[12]</sup>。



图 1 超细 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米颗粒, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米饼和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米环的 XRD 谱图

#### 2.2 SEM 和 TEM 分析

图 2 为超细 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米颗粒的 TEM 图。由图 2(a)可看出,所得样品大小均匀,平均粒径大小为  $\emptyset$ (5.5±0.8) nm。图 2(b)为超细 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米颗粒 的 HRTEM 图,纳米颗粒的晶面间距为 0.23 nm 和 0.25 nm,分别对应  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的{006}面和{110}面。



图 2 超细 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米颗粒的 TEM 图

通过控制反应时间和反应物浓度等实验条件, 可将超细 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米颗粒三维定向组装为饼状结构,经腐蚀镂空可进一步演化为纳米环状结构。图 3 为反应时间对产物形貌的影响。当反应时间为 1.5 h时,产物为典型的超细 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米颗粒(见图 3(a))。由图 3(b)可看出,在纳米颗粒中形成一些 不规则饼状产物。随着时间延长至 5 h,产物为典 型的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米饼,且形貌均匀(见图 3(c))。反应 10 h后,产物中心镂空形成典型的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米环结 构(见图 3(d))。



图 3 不同反应时间所得 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 产物的 SEM 图 图 4 为典型 Fe<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 纳米饼及纳米环的形貌表 征。由图 4(a)可看出,样品平均直径为Ø(160± 13) nm,厚度为(60±8) nm,颗粒表面粗糙不平,由 大量粒径为Ø(5~6) nm 的纳米颗粒构成,可能是 这些超细纳米颗粒相互联结而形成较大的饼状结 构。由图 4(b)可看出,边界有明显的由小颗粒组成 的纳米饼结构;插图为选区电子衍射(SEAD)图,其 与纯的赤铁矿一致,图中周期排列的二维衍射点表 明 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米饼为单晶结构。图 4(c)中晶格条纹 朝同一方向平行排列,进一步表明了 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米饼 的单晶特性,测量晶面间距为 0.25 nm, 对应  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的{110}面。由图 4(d)可看出,样品尺寸均 匀,平均直径为Ø(160±14) nm,平均孔径为Ø(83 ±11) nm,平均厚度为(40±8) nm。由图 4(e)可看 出,样品为中心镂空的环状结构,直径与典型 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米饼直径一致;插图为 SEAD 图,表明 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳 米环为单晶结构。由图 4(f)可知,晶面间距为 0.25 nm, 对应  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的{110} 面。



(a) 典型Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>纳米饼的形貌

(b) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>纳米饼的TEM图



图 4 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米饼及纳米环的 SEM、TEM、 SEAD 和 HRTEM 图

#### 2.3 可见光催化活性测定

图 5(a)为制备的超细 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米颗粒、纳米饼和纳米环的 UV-Vis 吸收谱图。由图可看出,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米饼和纳米环相较于超细 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米颗粒呈现明显的红移。根据带间跃迁公式,吸收系数  $\alpha$  和光学带隙  $E_{g}$  遵循以下关系<sup>[13-14]</sup>:

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \tag{1}$$

式中:A 为与材料性质(如价带和导带)相关的常数;  $h\nu$  为光子能量。图 5(a)中插图是由 UV-Vis 吸收 谱图计算得出的( $\alpha h\nu$ )<sup>2</sup>- $h\nu$  曲线。由拟合曲线可知, 超细 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米颗粒、纳米饼和纳米环的带隙值分 别为 3. 14 eV, 2. 31 eV 和 2. 02 eV,不同样品间



UV-Vis 吸收谱图的差别可归因于纳米粒子的尺寸 效应<sup>[14-15]</sup>。

图 5(b)~(c)为以纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为催化剂,在可 见光下降解罗丹明 B 稀溶液的实验,评估纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 材料的光催化性能。图中, $C_t$ 和  $C_0$  分别代 表罗丹明 B 在任意时刻 t 和初始时刻的浓度。图 5(b)表示在 4 h 的光照时间内罗丹明 B 分子特征 吸收峰(552 nm)的强度变化情况,由图可看出,经 可见光4 h辐照后,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米饼对罗丹明 B 染料 分子的降解率达到 87.9%;超细 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米颗粒、 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米环和空白对照组(无催化剂)4h降解率 分别为 39.4%,72.2%和 7.3%。Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米饼较 高的光催化活性可以归因于其较大的比表面积 (40.56 m<sup>2</sup> · g<sup>-1</sup>,大于 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米环的 26.8 m<sup>2</sup> · g<sup>-1</sup>,如表 1 所示),更多的表面活性位点有助于吸附 反应物,如 OH<sup>--</sup>和 H<sub>2</sub>O<sup>[16]</sup>。在制备的纳米氧化铁 中,超细 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米颗粒虽然具有最大的比表面积 (达到 256.2 m<sup>2</sup> · g<sup>-1</sup>,见表 1),但因其吸收峰在紫 外区(见图 5(a)),故在可见光下的光催化活性 较低。

表1 纳米 Fe2O3 的尺寸、带隙、比表面积和降解率

样品	直径/nm	厚度/nm	带隙/eV	比表面积/	$(1 - C_t /$	参考
				$(m^2 \cdot g^{-1})$	$C_0) / \frac{0}{0}$	文献
	约Ø80	约 80	1.90	43	70	[1]
纳米片	约Ø180	约 30	_	11.89	61.8	[5]
纳米棒	$\emptyset(106 \pm 3)$	$240 \pm 18$	1.55	7.5	55	[6]
纳米颗粒	$\emptyset(146\pm 8)$	$120\!\pm\!10$	1.92	10.31	65	[13]
纳米环	$\emptyset(153\pm10)$	$58\pm5$	1.90	12.71	79	[13]
纳米叶	约Ø5 000	约 5 000	—	8.26	70	[17]
超细 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 纳米颗粒	$\emptyset(5.5\pm0.8)$	3.9 $\pm 1$	3.14	256.2	39.4	本文
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 纳米饼状再组装结构	$\emptyset(160\pm13)$	$60\pm8$	2.31	40.56	87.9	本文
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 纳米环状再组装结构	$\emptyset(160\pm14)$	$40 \pm 8$	2.02	26.8	72.2	本文

离心回收纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 催化剂后再加入相同体 积和浓度的罗丹明 B 溶液,重复可见光催化降解实 验,进行 5 次循环,实验结果见图 5(c)。由图可见, 制备的纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在 5 次循环中基本保持了较稳定 的可见光催化活性,表明合成的纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 具有良 好的稳定性和可回收能力。

通过一系列的表征与实验可以看出,制备的超 细 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米颗粒自组装饼状结构表面粗糙,具有 较大的比表面积,可见光催化性能优于其他列出的 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米材料(见表 1),在光催化领域具有广阔 的应用前景。

3 结束语

本文通过水热法制备出平均粒径为 $\emptyset$ 5.5 nm 的超细 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米颗粒及其再组装纳米饼和纳米 环结构。在可见光的照射下,以罗丹明 B 为模拟污 染物对制备的纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 进行光降解实验,结果表 明,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米饼状再组装结构具有良好的光催化 活性,主要原因是 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米饼对可见光的高吸收 及其较大的比表面积。此外,5 次回收循环实验表 明合成的纳米 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 具有良好的稳定性和可回收 能力。这些特性表明超细 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米颗粒及其再 组装结构在催化领域中具有重要的实用意义。

### 参考文献:

- [1] WANG Chao, HUANG Zhixiong. Controlled synthesis alpha-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanostructures for efficient photocatalysis
  [J]. Materials Letters, 2016, 164:194-197.
- [2] MA Jianmin, MEI Lin, CHEN Yuejiao, et al. α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanochains: ammonium acetate-based ionothermal synthesis and ultrasensitive sensors for low-ppm-level H<sub>2</sub>S gas[J]. Nanoscale, 2013, 5(3):895-898.
- [3] WU Wei, WU Zhaohui, YU T, et al. Recent progress on magnetic iron oxide nanoparticles: synthesis, surface functional strategies and biomedical applications
   [J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2015,16(2):023501-023544.
- [4] XU Xiaodong, CAO Ruiguo, JEONG S, et al. Spindlelike mesoporous α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> anode material prepared from MOF template for high-rate lithium batteries[J]. Nano Letters, 2012, 12(9):4988-4991.
- [5] HAO Hongying, SUN Dandan, XU Yanyan, et al. Hematite nanoplates: Controllable synthesis, gas sensing, photocatalytic and magnetic properties[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2016, 462:315-324.

- [6] LI Pengwei, JI Jianlong, DENG Xiao, et al. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> icositetrahedra: evolution and their comparative photocatalytic activities [J]. Cryst Eng Comm, 2015, 17(38): 7283-7289.
- LIU Rongmei, JIANG Yuanwen, FAN Hao, et al. Metal ions induce growth and magnetism alternation of alpha-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> crystals bound by high-index facets[J]. Chemistry,2012,18(29):8957-8963.
- [8] LIU Xianghong, ZHANG Jun, WU Shihua, et al. Single crystal α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with exposed {104} facets for high performance gas sensor applications [J]. RSC Advances, 2012, 6:6178-6184.
- [9] GUIVAR J A R, SANCHES E A, BRUNS F, et al. Vacancy ordered γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles functionalized with nanohydroxyapatite: XRD, FTIR, TEM, XPS and mössbauer studies[J]. Applied Surface Science, 2016, 389:721-734.
- [10] XIAO Lisong, SCHROEDER M, KLUGE S, et al. Direct self-assembly of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/reduced graphene oxide nanocomposite for high-performance lithiumion batteries[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3 (21):11566-11574.
- [11] CAI Jinguang, CHEN Suyue, JI Mei, et al. Organic additive-free synthesis of mesocrystalline hematite nanoplates via two-dimensional oriented attachment [J]. Cryst Eng Comm, 2014, 16(8):1553-1559.

(上接第406页)

3 结束语

本文分析并设计了一种宽带高增益直角反射器 天线。该天线采用一分八并联网络馈电,实现了 VSWR≤2的相对阻抗带宽达 21.7%和高于 17 dBi 的天线增益。通过增加直角反射器,使得偶极子阵 列定向辐射,从而提高了天线的增益,使偶极子阵列 增益增加 5 dBi 左右。该天线可用于实现远距离 通信。

## 参考文献:

- [1] 黄国玉,冯军,陈文波,等.可重构等离子体角反射器 天线的设计与仿真[J].低温物理学报,2016,39(1): 78-82.
- [2] JUSOH M T.LAFOND O.COLOMBEL F.et al. Performance and radiation patterns of a reconfigurable plasma corner-reflector antenna [J]. IEEE Wireless Propag Let, 2013, 12: 1137-1140.
- [3] KRAUS J D. The corner-reflector antenna[J]. Proc

- [12] ZHANG Zhongping, SUN Haiping, SHAO Xiaoqiong, et al. Three-dimensionally oriented aggregation of a few hundred nanoparticles into monocrystalline architectures[J]. Advanced Materials, 2005, 17:42-46.
- [13] LI Pengwei, YAN Xiaole, HE Zaiqian, et al. α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> concave and hollow nanocrystals: top-down etching synthesis and their comparative photocatalytic activities [J]. Cryst Eng Comm, 2016, 18(10): 1752-1759.
- [14] LIU Wei, WANG Rongming, WANG Ning. From ZnS nanobelts to ZnO/ZnS heterostructures: Microscopy analysis and their tunable optical property[J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(4):041916.
- [15] LIAN Jiabiao, DUAN Xiaochuan, MA Jianmin, et al. Hematite ( $_{\alpha}$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) with various morphologies: ionic liquid-assisted synthesis, formation mechanism, and properties[J]. ACS Nano, 2009, 3(11): 3749-3761.
- [16] TIAN Jian, ZHAO Zhenhuan, KUMAR A, et al. Recent progress in design, synthesis, and applications of one-dimensional TiO<sub>2</sub> nanostructured surface heterostructures: a review [J]. Chemical Society Reviews, 2014,43(20):6920-6937.
- [17] XIE Shuting, HAN Jia, FEI Lu, et al. Controlled synthesis of alpha-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanostructures with the assistance of ionic liquid and their distinct photocatalytic performance under visible-light irradiation [J]. Cryst Eng Comm, 2015, 17(5):1210-1218.

IRE,1940,28(11): 513-519.

-----

- [4] CHANG D C, ZENG B H, LIU J C. Reconfigurable angular diversity antenna with quad corner reflector arrays for 2. 4 GHz applications[J]. IET Micorw Antennas Propag, 2009, 3: 522-528.
- [5] MILIJIĆ M, NEŠIĆ A D, MILOVANOVIĆ B. Design, realization, and measurements of a corner reflector printed antenna array with cosecant squared-shaped beam pattern [J]. IEEE Antennas Wireless Propag Lett, 2016, 15: 421-424.
- [6] INAGAKI N. Three-dimensional corner-reflector antenna[J]. IEEE Trans Antennas Propag, 1974, 22(4); 580-582.
- [7] HARMOUCH A, MOUCARY C E, ZIADE M, et al. Enhancement of directional characteristic of corner reflector antennas using metallic scatters [C]//S. l. : Proc 19<sup>th</sup> ICT, 2012.
- [8] ELKAMCHOUCHI H M. Cylindrical and three-dimensional corner reflector antennas[J]. IEEE Trans Antennas Propag, 1983, 31(3): 451-455.