

## 激光与光电子学进展

## MgO 薄膜嵌埋 Fe 纳米颗粒的紫外窄带增透研究

方晶晶<sup>1,3,4</sup>, 曹林洪<sup>1,3,4\*\*</sup>, 俞健<sup>5\*\*\*</sup>, 王进<sup>1,3,4</sup>, 符亚军<sup>1,3,4</sup>, 兰婉婷<sup>1,3,4</sup>, 张靖松<sup>1,3,4</sup>, 吴卫东<sup>2,3,4\*</sup><sup>1</sup>西南科技大学材料科学与工程学院, 四川 绵阳 621000;<sup>2</sup>中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;<sup>3</sup>四川省军民融合研究院, 四川 绵阳 621000;<sup>4</sup>西南科技大学极端条件物质特性联合实验室, 四川 绵阳 621000;<sup>5</sup>深圳技术大学先进材料测试技术研究中心, 广东 深圳 518118

**摘要** 采用脉冲激光气相沉积技术制备了 Fe/MgO 纳米复合薄膜, 研究了脉冲数对复合薄膜结构、成分和光学性质的影响。X 射线衍射分析表明: 沉积的 Fe 纳米颗粒在脉冲数大于 500 时出现了晶面取向为 (211) 的衍射峰, 证实了该复合薄膜中 Fe、Mg、O 元素的存在; Fe 纳米颗粒在 MgO 薄膜中部分被氧化, 存在单质态与氧化态 (含量比约为 3:2)。高分辨透射电子显微镜分析表明: 当脉冲数为 100 时, 平均粒径约为 2.73 nm 的 Fe 纳米颗粒在 MgO 薄膜中呈椭球型均匀分布, 且 Fe 纳米颗粒之间的平均间距约为 1.75 nm。椭圆偏振光谱分析表明: 当波长小于 365 nm 时, Fe/MgO 纳米复合薄膜的折射率和色散灵敏度随脉冲数的增加而增加。紫外可见光谱分析表明: 相比纯 MgO 薄膜, Fe/MgO 纳米复合薄膜在 190~235 nm 波段出现了明显的紫外窄带增透现象; 当作用于 Fe 靶的激光脉冲数达到 300 时, Fe/MgO 纳米复合薄膜在 197 nm 处的透过率约为 69.4%。

**关键词** 薄膜; Fe/MgO 纳米复合薄膜; 紫外增透; 椭圆偏振; 吸收

中图分类号 O484

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP213239

## Ultraviolet Narrow Band Antireflection of Fe Nanoparticles Embedded in MgO Films

Fang Jinjing<sup>1,3,4</sup>, Cao Linhong<sup>1,3,4\*\*</sup>, Yu Jian<sup>5\*\*\*</sup>, Wang Jin<sup>1,3,4</sup>, Fu Yajun<sup>1,3,4</sup>, Lan Wanting<sup>1,3,4</sup>, Zhang Jingsong<sup>1,3,4</sup>, Wu Weidong<sup>2,3,4\*</sup><sup>1</sup>School of Materials Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, Sichuan, China;<sup>2</sup>Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;<sup>3</sup>Sichuan Civil-Military Integration Institute, Mianyang 621000, Sichuan, China;<sup>4</sup>Joint Laboratory for Extreme Conditions Matter Properties, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, Sichuan, China;<sup>5</sup>Research Center of Advanced Material Testing Technology, Shenzhen Technology University, Shenzhen 518118, Guangdong, China

**Abstract** Fe/MgO nanocomposite films are prepared using pulsed laser deposition, and the effects of pulse number on the structure, composition, and optical properties of the composite films are studied in this paper. X-ray diffraction analysis shows that a diffraction peak with a crystal plane orientation of (211) appears when the pulse number of the deposited Fe nanoparticles is greater than 500, confirming the existence of Fe, Mg, and O elements in the composite film; part of the Fe nanoparticles in MgO film is oxidized, thus existing in the elemental and oxidized states (content ratio of ~3:2). High-resolution transmission electron microscopy analysis shows that when the pulse number is 100, Fe nanoparticles with an average particle size of ~2.73 nm are uniformly distributed in an ellipsoid shape in the MgO film, and the average spacing between Fe nanoparticles is ~1.75 nm. Ellipsometry analysis shows that the refractive index and dispersion sensitivity of the Fe/MgO nanocomposite films increases as the pulse number increasing when the wavelength is less than

收稿日期: 2021-12-15; 修回日期: 2022-01-16; 录用日期: 2022-01-17; 网络首发日期: 2022-01-27

基金项目: 西南科技大学博士基金(19zx7131, 18zx7132)、四川省自然科学基金青年项目(2022NSFSC2014)

通信作者: \*wuweidongdin@163.com; \*\*hyclh@yeah.net; \*\*\*yujian@sztu.com

365 nm. Ultraviolet-visible spectral analysis shows that Fe/MgO nanocomposite films exhibit an obvious ultraviolet narrow-band antireflection phenomenon in the wavelength range of 190–235 nm compared with pure MgO films; the transmittance of the composite film at 197 nm is ~69.4%.

**Key words** film; Fe/MgO nanocomposite film; ultraviolet antireflection; elliptical polarization; absorption

## 1 引言

MgO 作为一种优良的光学材料<sup>[1-2]</sup>, 在 300~2500 nm 波段具有良好的透过率, 因此被广泛应用于航空航天、光电器件等领域<sup>[3-5]</sup>。近年来, 针对 MgO 增透所做的工作大多聚焦于改善其可见光波段<sup>[6]</sup>或红外波段<sup>[7-8]</sup>的透光性。Lee 等<sup>[6]</sup>报道了 MgO/ZnO 分层纳米结构, 该结构可以抑制 MgO 在 400~1000 nm 波段内的反射。Wang 等<sup>[8]</sup>通过在 MgO 中嵌埋 Gd 纳米颗粒, 实现了在 500~2500 nm 波段的增透。目前, 关于 MgO 在深紫外波段(波长  $\lambda < 280$  nm)的增透研究较少。原因是深紫外波段光子能量逐渐接近 MgO 的禁带宽度<sup>[9-10]</sup>, 使 MgO 的透光性随着波长的减小逐渐降低<sup>[11]</sup>, 限制了其在深紫外波段的应用。

已有研究中实现增透的方式主要有两种, 即镀制多层介质膜<sup>[12-13]</sup>和在器件表面加工亚波长尺度的微纳结构<sup>[14-16]</sup>。多层介质膜属于传统膜系结构, 材料选择多, 但镀制过程繁琐, 耗时长, 且膜层之间存在黏附及热膨胀系数不匹配等问题; 加工微纳结构方法实现的增透效果明显, 但工艺复杂, 技术要求高。大量研究表明, 在金属氧化物薄膜中嵌入金属纳米粒子可以有效提高金属氧化物薄膜的透过率<sup>[8, 17-18]</sup>, 同时兼具介质膜

特性和微纳结构的双重优势。脉冲激光沉积(PLD)技术<sup>[19-22]</sup>可以生长出高品质的氧化物薄膜, 且能通过调节激光脉冲数控制纳米颗粒的大小及距离<sup>[23]</sup>, 得到理想的亚波长微结构, 提高材料在深紫外波段的透光性。

针对上述问题, 本文采用 PLD 技术, 在 MgO (100) 单晶基质上制备了一系列 Fe/MgO 纳米复合薄膜。通过调节激光脉冲数控制嵌埋在 MgO 中的 Fe 纳米颗粒的大小和分布, 获得不同含量的 Fe/MgO 纳米复合薄膜, 研究了纳米复合薄膜的结构与光学性质。

## 2 实验设置

### 2.1 样品制备

采用 PLD 技术在 MgO (100) 单晶衬底上生长 Fe/MgO 纳米复合薄膜, 具体的实验参数如表 1 所示。制备步骤: 首先, 对 MgO 衬底在真空环境中进行 1 h 原位热处理 (550 °C), 以去除 MgO 衬底表面的有机物; 然后, 在 MgO 衬底上外延生长约 15 nm 厚的 MgO 薄膜, 并在 MgO 外延层上沉积分散的 Fe 纳米颗粒; 最后, 在分散的 Fe 纳米颗粒上覆盖一层厚度为 15 nm 的 MgO 薄膜, 形成 Fe/MgO 复合纳米薄膜。具体制备流程如图 1 所示。

表 1 Fe/MgO 纳米复合薄膜生长的实验参数

Table 1 Experimental parameters for the growth of Fe/MgO nanocomposite films

Experimental condition	Experimental parameter
Background vacuum /Pa	$\sim 2 \times 10^{-6}$
Working vacuum /Pa	$\sim 1 \times 10^{-5}$
Target	Fe (purity greater than 99.9%); MgO (purity greater than 99.99%)
Substrate	MgO (100) single crystal
Distance between target and substrate /cm	5
Laser	Wavelength is 248 nm; frequency is 2 Hz; energy for Fe target and MgO target is 1 J/cm <sup>2</sup> and 1.25 J/cm <sup>2</sup> respectively
Annealing condition	550 °C; 4 h
Oxygen treatment condition	1 Pa; 30 min

基于上述实验条件, 制备了不同含量(Fe 的脉冲数)的 Fe/MgO 纳米复合薄膜, 由于 Fe 含量相对较低, 难以进行定量分析, 因此用实验中 Fe 激光脉冲数进行标定, 分别标记为 1#~5#, 如表 2 所示。

### 2.2 结构与性能表征

利用掠入射 X 射线衍射仪(GIXRD, DMAX1400, 日本)在 20°~90°扫描范围内表征样品的晶体结构(掠入射角度为 1°, 探测器步进角为 0.02°)。采用原子力

显微镜(AFM, SPA-300HV, 日本)和高分辨透射电子显微镜(HRTEM, Carl zeiss irts Libra200, 德国)表征样品的表面形貌和微观结构。使用 X 射线光电子能谱(XPS, ESCALab 250Xi, 美国)获得薄膜元素价态。采用紫外可见光谱仪(UV-vis, LS5-Lambda950, 美国)和椭圆偏振光谱仪(SENTECH 850, 美国)研究样品的光学性能。

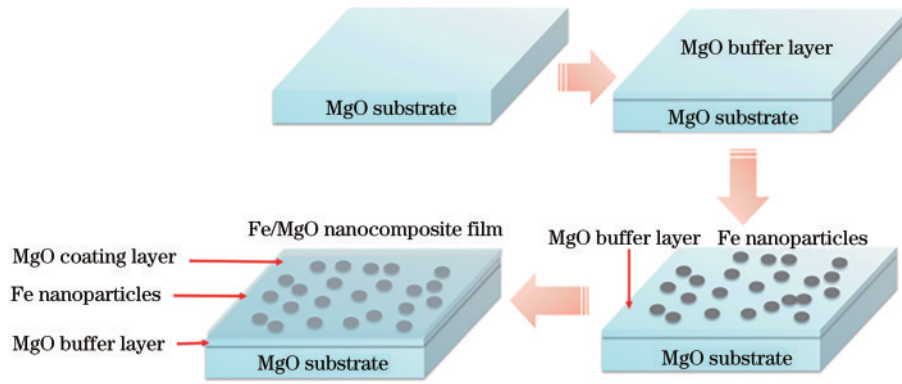


图 1 Fe/MgO 纳米复合薄膜的制备流程

Fig. 1 Preparation process of Fe/MgO nanocomposite film

表 2 不同编号 Fe/MgO 纳米复合薄膜对应的激光脉冲数  
Table 2 Number of laser pulses corresponding to Fe/MgO nanocomposite films with different numbers

Sample No.	Number of laser pulses
1#	100
2#	200
3#	300
4#	500
5#	600

### 3 结果与讨论

图 2 为 MgO(100) 衬底及 Fe/MgO 纳米复合薄膜的 GIXRD 谱。可以发现,除了 4# 和 5# 样品外,其余样品和 MgO 薄膜均不存在衍射峰。原因是对晶体结构的表征过程中入射角较小<sup>[8]</sup>。此外,1#~3# 纳米复合薄膜中 Fe 含量相对较低,在 X 射线衍射仪的灵敏范围无法检测。随着激光脉冲数的增加,4# 和 5# 样品中的 Fe 含量增加,在衍射峰  $2\theta \approx 81.37^\circ$  处仅出现一个衍射峰,对应于 Fe(211) 晶面,与标准卡片(JCPDS 85-1410)相匹配<sup>[24]</sup>。这表明 Fe/MgO 纳米复合薄膜中存在 Fe 相,且 Fe 很好地沉积在了 MgO 薄膜上。

图 3 为 Fe/MgO 纳米复合薄膜的 AFM 三维表面

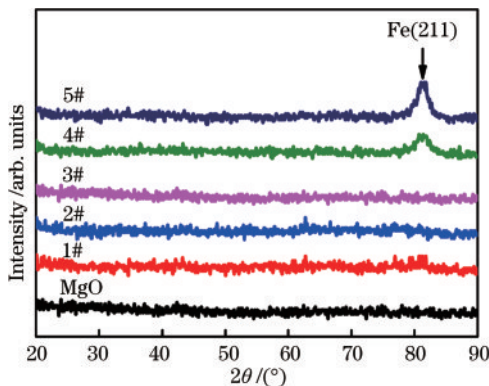


图 2 Fe/MgO 纳米复合薄膜样品的 GIXRD 图谱

Fig. 2 GIXRD spectrum of Fe/MgO nanocomposite films

形貌图。可以发现:未沉积 Fe 纳米颗粒的 MgO 单晶衬底表面平整,其表面粗糙度在 1 nm 以内,如图 3(a) 所示;随着 Fe 纳米颗粒的沉积,Fe/MgO 纳米复合薄膜表面粗糙度明显增加,且随沉积 Fe 脉冲数的增加而增加<sup>[25-26]</sup>;当沉积脉冲数较少时,样品表面颗粒细小且分布均匀,如图 3(b) 所示;随着沉积 Fe 纳米颗粒的脉冲数增加,Fe 纳米颗粒出现相互聚集并逐渐长大的趋势,如图 3(c) 和图 3(d) 所示。

图 4 为 1# 样品的 Fe/MgO 纳米复合薄膜的透射电子显微镜(TEM)和 HRTEM 图。从图 4(a) 可以发现,颜色较深的区域为 Fe 纳米颗粒,颜色较浅的区域为 MgO 薄膜<sup>[27]</sup>,且 Fe 纳米颗粒均匀分布在 MgO 中。从图 4(b) 和图 4(c) 可以发现,Fe 纳米颗粒的平均粒径为 2.73 nm<sup>[28]</sup>,纳米颗粒之间的平均间距为 1.75 nm。从图 4(d) 可以发现,Fe 纳米颗粒呈椭球状,对 Fe 纳米颗粒晶格条纹进行傅里叶逆变换,计算得到晶面间距  $d \approx 0.2$  nm,对应于 Fe(100) 晶面<sup>[24]</sup>。

图 5(a) 为 1# 样品的 XPS 全谱。可以发现,1# 样品中存在 Mg、O、Fe 三种元素且无杂质。图 5(b) 为 Mg 2p 的 XPS 分谱图。可以发现,Mg 2p 的结合能位于 49.37 eV 处<sup>[29-30]</sup>,根据校准数据库可知该结合能对应 MgO 薄膜构型中 Mg 的价态。图 5(c) 为 O 1s 的 XPS 分谱图。可以发现,O 1s 峰左右不对称,经过 XPS 后可以分出 3 个峰,其结合能分别位于 529.21, 530.16, 531.28 eV 处。其中,529.21 eV 处对应 MgO 中的 O 原子的价态<sup>[29-32]</sup>,530.16 eV 处对应 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 中 O 原子的价态,而 531.28 eV 处对应于表面吸附 H<sub>2</sub>O 中的 O 原子的价态。图 5(d) 为 Fe 2p 的 XPS 分谱图。可以发现,Fe 2p<sup>[32-35]</sup> 在 705.91 eV 和 719.18 eV 处出现了典型的双峰,分别对应 Fe 2p<sub>3/2</sub> 和 Fe 2p<sub>1/2</sub> 芯能级,Fe 2p<sub>3/2</sub> 和 Fe 2p<sub>1/2</sub> 的峰值比为 2:1,且通过 XPS 后可以分出 5 个峰,结合能分别位于 705.78, 706.51, 709.47, 718.89, 720.54 eV 处。其中,705.78 eV 和 706.51 eV 表示 Fe 单质的存在,其余结合能峰值处则表示 Fe 的氧化态。进一步分析表明,Fe 纳米颗粒中单质态与氧化态的含量比约为 3:2。



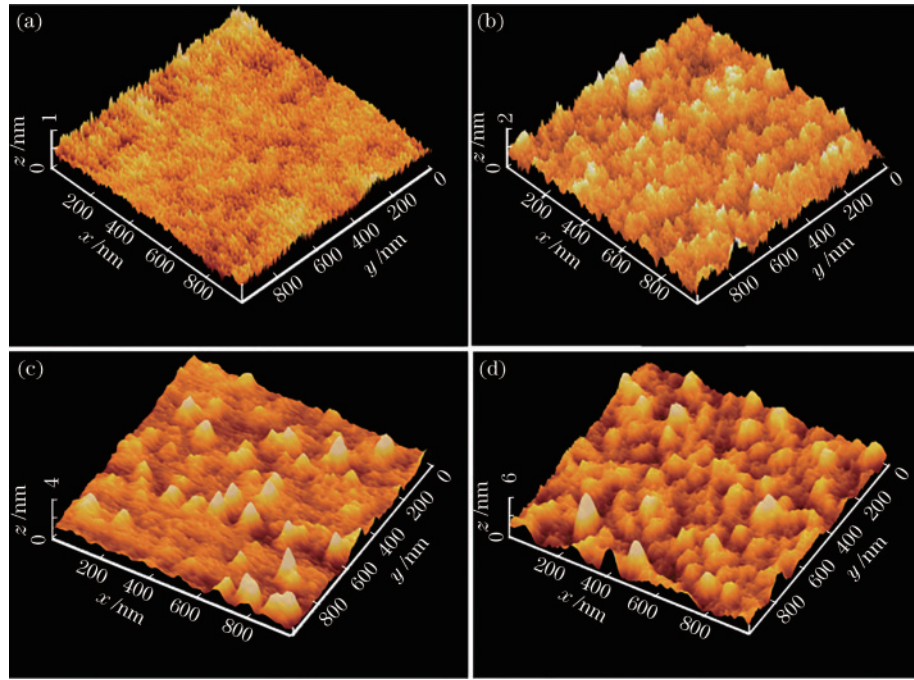


图 3 Fe/MgO 纳米复合薄膜的 AFM 三维图。(a) MgO 衬底；(b) 1# 样品；(c) 3# 样品；(d) 4# 样品  
Fig. 3 AFM 3D images of Fe/MgO nanocomposite films. (a) MgO substrate; (b) 1# sample; (c) 3# sample; (d) 4# sample

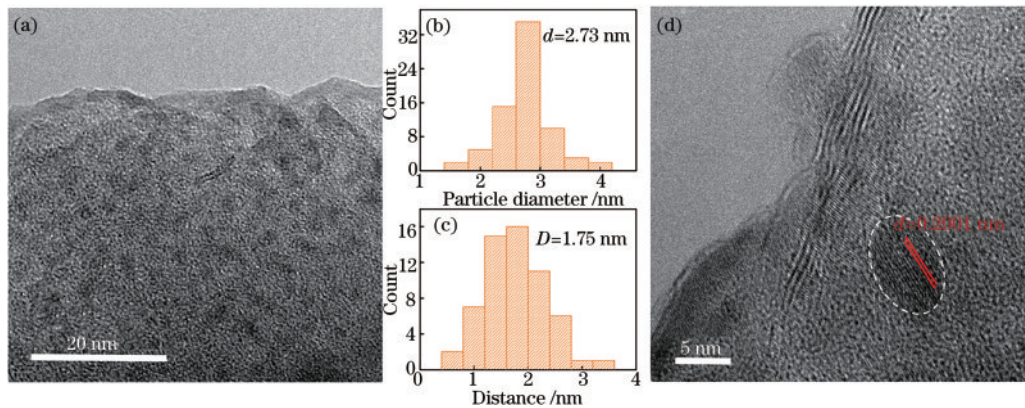


图 4 Fe/MgO 纳米复合薄膜的 TEM 图。(a) 1# 样品的 TEM 形貌图；(b) Fe 纳米颗粒的粒径统计直方图；(c) Fe 纳米颗粒的间距分布直方图；(d) 1# 样品的 HRTEM 图谱  
Fig. 4 TEM images of Fe/MgO nanocomposite films. (a) TEM morphology of 1# sample; (b) particle size statistical histogram of Fe nanoparticles; (c) spacing distribution histogram of Fe nanoparticles; (d) HRTEM pattern of 1# sample

图 6(a) 为 Fe/MgO 纳米复合薄膜折射率  $n$  与  $\lambda$  的关系图。可以发现, 当波长小于 365 nm 时, 1#~5# 样品均遵从波长减小而折射率增加的规律<sup>[36]</sup>。但不同样品的折射率对波长的敏感度不同, 即折射率的色散率有异。用  $\left| \frac{dn/d\lambda}{n} \right|$  计算折射率的色散灵敏度, 计算结果如图 6(b) 所示。可以发现, 随着波长的减小, 其色散灵敏度迅速增加且在紫外区域最明显。这表明样品在紫外区域很敏感。折射率<sup>[37]</sup>可表示为

$$n = 1 + \frac{Nq_e^2}{2\epsilon_0 m (\omega_0^2 - \omega^2)}, \quad (1)$$

式中:  $N$  为单位体积的电荷数;  $q_e$  为电子电荷;  $\epsilon_0$  为真空介电常数;  $m$  为电子质量;  $\omega_0$  为束缚于原子上的电子的

本征振子频率;  $\omega$  为辐射的(角)频率。对式(1)进行微分, 得到

$$\frac{dn/d\lambda}{n} = \frac{2\pi c_1 \omega^3}{c(c_1 + \omega_0^2 - \omega^2)(\omega_0^2 - \omega^2)}, \quad (2)$$

式中:  $c$  为光速;  $c_1 = \sqrt{q_e^2 / (2me)}$ ,  $e$  为元电荷。

当 Fe 纳米颗粒嵌埋在 MgO 薄膜中时, Fe/MgO 纳米复合薄膜则组成了一个介质体系。金属纳米颗粒嵌埋在 MgO 中时, 随着激光脉冲数的增加, 金属纳米颗粒的直径没有发生显著改变, 但是颗粒间距却在减小, 单位面积内的金属纳米颗粒增加<sup>[38]</sup>, 导致单位面积上的电子数量增加。由式(1)可知, 随着样品中 Fe 纳米颗粒密度的增加, 纳米复合薄膜的折射率也随之增加。在测量范围内, 由式(2)可知, 随着波长的减小( $\omega$

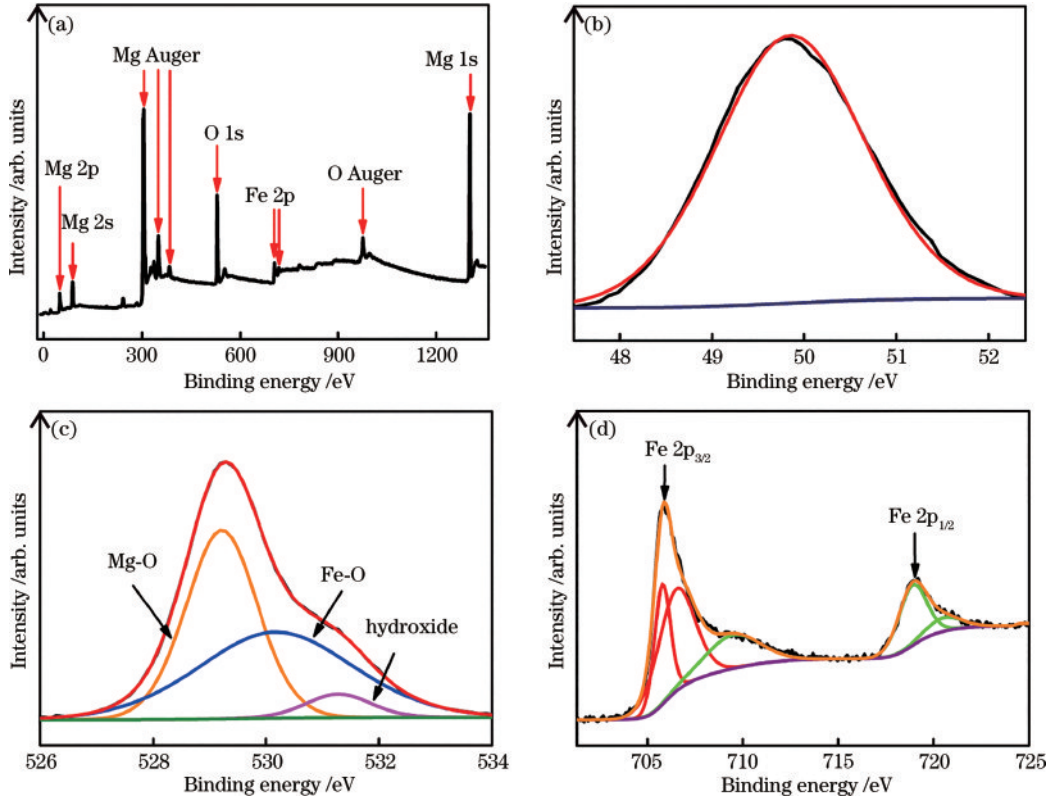


图 5 1#样品的 XPS 图谱。(a)全谱;(b)Mg 2p;(c)O 1s;(d)Fe 2p  
Fig. 5 XPS spectra of 1# sample. (a) Survey spectrum; (b) Mg 2p; (c) O 1s; (d) Fe 2p

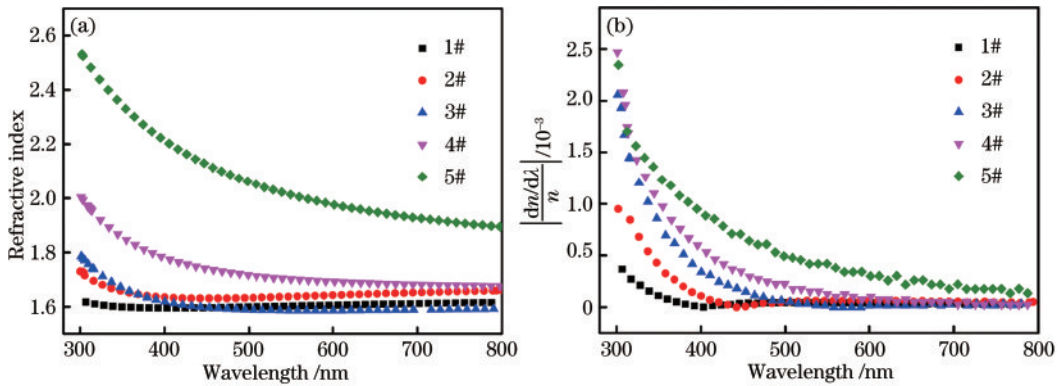


图 6 Fe/MgO 纳米复合薄膜的椭圆偏振光谱图。(a)折射率;(b)折射率的色散灵敏度  
Fig. 6 Elliptical polarization spectrograms of Fe/MgO nanocomposite films. (a) Refractive index; (b) dispersion sensitivity of refractive index

增加), 折射率的色散灵敏度在短波处迅速增加。

图 7(a)为 Fe/MgO 纳米复合薄膜透过率  $T$  与  $\lambda$  的关系图。可以发现,除了纯 MgO 单晶外,所有薄膜样品在 190~235 nm 波段都存在明显透过峰。从图 7(a)的插图发现,透过效果最好的为 3# 样品,在 197 nm 波长处,透过率达到了 69.4%,约为 MgO(8.9%)的 7.7 倍,这是一种明显的紫外窄带增透现象<sup>[39-40]</sup>。图 7(b)为 Fe/MgO 纳米复合薄膜吸光度  $A$  与光子能量  $E$  的关系<sup>[41]</sup>。图 7(c)~(h)分别是纯 MgO 以及 1#~5# 样品分峰拟合后得到的吸收光谱。1#~5# 样品分峰拟合后得到的吸收峰如表 3 所示。已知 MgO 的带隙约为 7.6 eV,而紫

外-可见光谱测量的最短波长为 190 nm,对应的能量为 6.5 eV,所以 MgO 在 0.8~6.5 eV 范围内理论上不应存在吸收峰。从图 7(b)可以发现,纯 MgO 和薄膜样品均在 5.13~5.40 eV(峰 4)范围内出现了明显的吸收峰。这表明本工作中纯 MgO 基片存在  $O_{4c}^{2-}$  缺陷<sup>[8,42]</sup>,它对应于立方体边缘的缺陷。随着嵌入在 MgO 薄膜中的 Fe 纳米颗粒数的增加,在 1.40~2.19 eV、2.80~3.37 eV、4.10~4.22 eV 范围内出现了 3 个新的吸收峰(峰 1、峰 2 和峰 3)。对于新出现的峰 1 和峰 2,可能是 Fe/MgO 纳米复合薄膜内等离激元共振吸收引起的。之所以存在两个共振吸收峰,是由于嵌入在 MgO



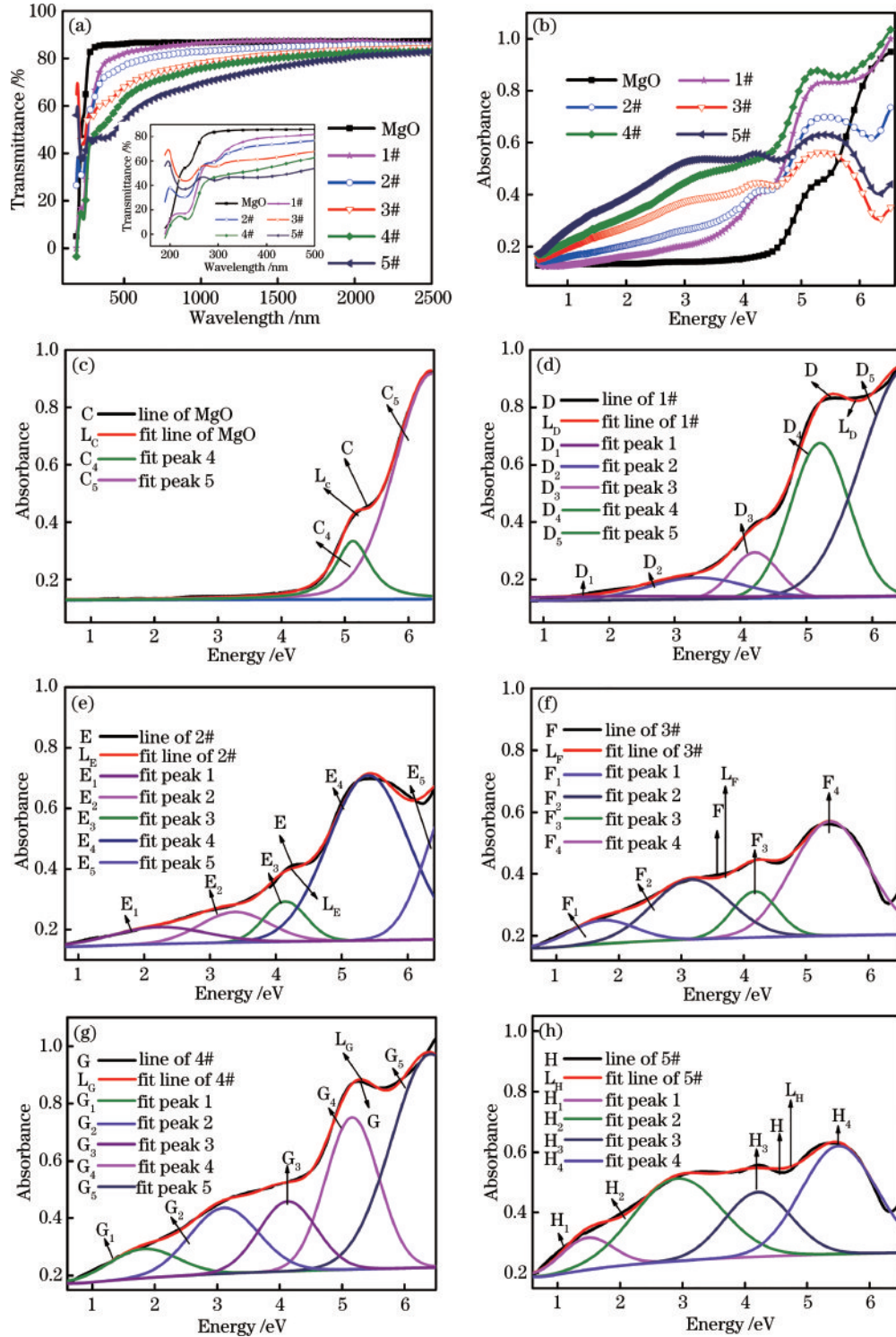


图 7 Fe/MgO 纳米复合薄膜的紫外可见光谱图。(a)透射光谱;(b)吸收光谱;(c)MgO 基底的吸收峰;(d)~(h)1#~5#样品的吸收峰  
Fig. 7 UV-vis spectra of Fe/MgO nanocomposite films. (a) Transmission spectra; (b) absorption spectra; (c) absorption peaks of MgO substrate; (d)~(h) absorption peaks of 1#~5# samples

薄膜中的 Fe 纳米颗粒呈旋转椭球型,其表面电荷集中于两个等位面上(长轴面和短轴面),这两个面的电荷密度不同,导致整个薄膜体系存在两个共振吸收峰。Agrawal 等<sup>[43]</sup>和 Mayer 等<sup>[44]</sup>对此现象做过成分阐述,不再赘述。样品中心出现的峰 3 对应  $O_{3c}^{2-}$  缺陷(立方体尖角处)<sup>[8,42]</sup>,新出现的峰 3 与 Fe 纳米颗粒嵌入 MgO 薄膜中有关。当 Fe 纳米颗粒嵌入 MgO 薄膜

中, MgO 晶格与 Fe 晶格失配度较大,使 MgO 与 Fe 晶界边缘处的氧空位缺陷密度增大,同时在尖端处产生了新的氧空位缺陷  $O_{3c}^{2-}$ 。对于出现在 6.36~6.73 eV 范围内的吸收峰(峰 5),情况较为特殊。由于此处距 7.6 eV 较近,属于吸收尾段<sup>[45-46]</sup>,形成机制较为复杂,目前尚无确定结论。

表 3 Fe/MgO 纳米复合薄膜的吸收峰

Table 3 Absorption peaks of Fe/MgO nanocomposite film

unit: eV

Sample	Peak 1	Peak 2	Peak 3	Peak 4	Peak 5
MgO				5.13	6.36
1#	1.78	3.34	4.22	5.21	6.54
2#	2.19	3.37	4.14	5.40	6.73
3#	1.73	3.15	4.18	5.39	
4#	1.81	3.10	4.13	5.16	6.42
5#	1.4	2.8	4.1	5.4	

## 4 结 论

采用 PLD 技术,通过调控沉积 Fe 纳米颗粒的脉冲数,制备了 Fe/MgO 纳米复合薄膜。结构分析表明,Fe 纳米颗粒成功嵌入在 MgO 薄膜中,形成了亚波长的微结构,有利于 Fe/MgO 纳米复合薄膜在深紫外区域的窄带增透。通过光学测试也证实了这种结构在 190~235 nm 波段范围内透过率约为纯 MgO 的 7.7 倍,原因是 Fe 纳米颗粒的尺寸远小于入射波长,形成了一种亚波长增透现象。同时,波长小于 365 nm 时,其折射率也随 Fe 纳米颗粒的含量增加而增加。通过改变 Fe 纳米颗粒的脉冲数,在紫外区域可调控 Fe/MgO 纳米复合薄膜的光学性质,为 MgO 薄膜在紫外区域的增透应用提供了基础研究。

## 参 考 文 献

- [1] 刘超. 单晶 MgO 抛光基片高质量表面保护研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007: 1-15.  
Liu C. Study on high quality surface protection of single crystal MgO polishing substrate[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007: 1-15.
- [2] 汪佳. MgO 材料电子结构和光学性质研究[D]. 南京: 东南大学, 2016: 1-15.  
Wang J. The electronic structure and optical characteristics of magnesium oxide crystals[D]. Nanjing: Southeast University, 2016: 1-15.
- [3] Liu L H, Morita K, Suzuki T S, et al. Synthesis of highly-infrared transparent  $Y_2O_3$ -MgO nanocomposites by colloidal technique and SPS[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(9): 13669-13676.
- [4] Andrushchak A, Buryy O, Andrushchak N, et al. General method of extreme surfaces for geometry optimization of the linear electro-optic effect on an example of  $LiNbO_3$ : MgO crystals[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(22): 6255-6262.
- [5] Abbasloo M, Shokrollahi H, Alhaji A. Slip-casting process of MgO- $Y_2O_3$  nanocomposite: investigation of powder synthesis method[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, 254: 123387.
- [6] Lee J W, Ye B U, Kim D Y, et al. ZnO nanowire-based antireflective coatings with double-nanotextured surfaces [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(3): 1375-1379.

- [7] Permin D A, Boldin M S, Belyaev A V, et al. IR-transparent MgO-Gd $_2$ O $_3$  composite ceramics produced by self-propagating high-temperature synthesis and spark plasma sintering[J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2021, 10(2): 237-246.
- [8] Wang M J, Wang X M, Yin H B, et al. Controllable fabrication of a super broadband antireflection film: Gd: MgO nanoparticles composite film by pulsed laser deposition method[J]. *Vacuum*, 2021, 190: 110310.
- [9] Heo S, Cho E, Lee H I, et al. Band gap and defect states of MgO thin films investigated using reflection electron energy loss spectroscopy[J]. *AIP Advances*, 2015, 5(7): 077167.
- [10] Zhang Y G, He H Y, Pan B C. Structural features and electronic properties of MgO nanosheets and nanobelts [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2012, 116(43): 23130-23135.
- [11] Tlili M, Nefzi C, Alhalaili B, et al. Synthesis and characterization of MgO thin films obtained by spray technique for optoelectronic applications[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(11): 3076.
- [12] Fang C L, Yang Z T, Zhang J, et al. Biomimetic diodon-skin nanothorn polymer antireflection film for solar cell applications[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2020, 206: 110305.
- [13] Kim M, Kang T W, Kim S H, et al. Antireflective, self-cleaning and protective film by continuous sputtering of a plasma polymer on inorganic multilayer for perovskite solar cells application[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2019, 191: 55-61.
- [14] Tan G J, Lee J H, Lan Y H, et al. Broadband antireflection film with moth-eye-like structure for flexible display applications[J]. *Optica*, 2017, 4(7): 678-683.
- [15] Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F, et al. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. *Nature*, 1998, 391(6668): 667-669.
- [16] 叶鑫, 蒋晓东, 肖磊, 等. 二氧化硅亚波长纳米微结构的增透特性[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(9): 1987-1990.  
Ye X, Jiang X D, Xiao L, et al. Transmission of silica sub-wavelength nano-microstructure[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(9): 1987-1990.
- [17] Badawi A, Ahmed E M, Mostafa N Y, et al. Enhancement of the optical and mechanical properties of chitosan using Fe $_2$ O $_3$  nanoparticles[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2017, 28(15): 10877-10884.
- [18] Singh B, Shabat M M, Schaadt D M. Wide angle antireflection in metal nanoparticles embedded in a dielectric matrix for plasmonic solar cells[J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2020, 28(7): 682-690.
- [19] Nagajothi P C, Sreekanth T V M. Green synthesis of metallic and metal oxide nanoparticles and their antibacterial activities[M]//Basiuk V A, Basiuk E V. *Green processes for nanotechnology*. Cham: Springer, 2015: 99-117.
- [20] Yu J, Xiao T T, Wang X M, et al. Splitting of the

- ultraviolet plasmon resonance from controlling FePt nanoparticles morphology[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 435: 1-6.
- [21] Krebs H U, Weisheit M, Faupel J, et al. Pulsed laser deposition (PLD): a versatile thin film technique[M]// Kramer B. *Advances in solid state physics*. Heidelberg: Springer, 2003, 43: 505-518.
- [22] 田梦瑶, 左佩, 梁密生, 等. 飞秒激光加工低维纳米材料及应用[J]. *中国激光*, 2021, 48(2): 0202004.  
Tian M Y, Zuo P, Liang M S, et al. Femtosecond laser processing of low-dimensional nanomaterials and its application[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(2): 0202004.
- [23] 代守军, 余锦, 翁泽强, 等. 脉冲激光沉积微粒控制技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(1): 0100004.  
Dai S J, Yu J, Mo Z Q, et al. Particulate control technology based on pulsed laser deposition[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(1): 0100004.
- [24] Feng H, Zhang X N, Wang Z X, et al. Adsorption and vibration of O atoms on Fe low-index and Fe(211) high-index surfaces[J]. *Chemical Research in Chinese Universities*, 2007, 23(2): 226-232.
- [25] Cheng Y H, Kupfer H, Richter F, et al. Deposition of MgO films by pulsed mid-frequency magnetron sputtering [J]. *Applied Surface Science*, 2002, 200(1/2/3/4): 117-124.
- [26] 刘磊, 余亮, 李学留, 等. PLD制备的Cu掺杂SnS薄膜的结构和光学特性[J]. *发光学报*, 2015, 36(11): 1311-1319.  
Liu L, Yu L, Li X L, et al. Structure and optical properties of Cu-doped SnS thin films prepared by PLD[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(11): 1311-1319.
- [27] Yin H B, Zhao Y, Xu X B, et al. Realization of tunable localized surface plasmon resonance of Cu@Cu<sub>2</sub>O core-shell nanoparticles by the pulse laser deposition method [J]. *ACS Omega*, 2019, 4(11): 14404-14410.
- [28] Kholmanov I N, Gavioli L, Fanetti M, et al. Effect of substrate surface defects on the morphology of Fe film deposited on graphite[J]. *Surface Science*, 2007, 601(1): 188-192.
- [29] Denny Y R, Firmansyah T, Gustiono V, et al. Effect of substrate temperature on the electronic properties of MgO thin films on Si (100) grown by electron beam evaporation [J]. *Key Engineering Materials*, 2020, 841: 243-247.
- [30] Corneille J S, He J W, Goodman D W. XPS characterization of ultra-thin MgO films on a Mo(100) surface[J]. *Surface Science*, 1994, 306(3): 269-278.
- [31] Toyoshima R, Kawai J, Isegawa K, et al. Detailed characterization of MoO<sub>3</sub>-modified Rh metal particles by ambient-pressure XPS and DFT calculations[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2021, 125(8): 4540-4549.
- [32] Moulder J F, Stickle W F, Sobol P E. *Handbook of X ray photoelectron spectroscopy*[M]. Minnesota: Perkin-Elmer Corporation, 1993.
- [33] Bhargava G, Gouzman I, Chun C M, et al. Characterization of the “native” surface thin film on pure polycrystalline iron: a high resolution XPS and TEM study[J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253(9): 4322-4329.
- [34] Liu H M, Wei G L, Xu Z, et al. Quantitative analysis of Fe and Co in Co-substituted magnetite using XPS: the application of non-linear least squares fitting (NLLSF)[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 389: 438-446.
- [35] Graat P C J, Somers M A J. Simultaneous determination of composition and thickness of thin iron-oxide films from XPS Fe 2p spectra[J]. *Applied Surface Science*, 1996, 100/101: 36-40.
- [36] Yang C, Fan H Q, Xi Y X, et al. Effects of depositing temperatures on structure and optical properties of TiO<sub>2</sub> film deposited by ion beam assisted electron beam evaporation[J]. *Applied Surface Science*, 2008, 254(9): 2685-2689.
- [37] 费曼. 费曼物理学讲义[M]. 王子辅, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 1981: 289-292.  
Feynman R P. *Feynman Physics Handout*[M]. Wang Z F, Transl. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1981: 289-292.
- [38] 俞健. FePt NPs:MgO 纳米复合薄膜的制备及其磁、光特性研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2019: 46-51.  
Yu J. Preparation and magnetic and optical properties of FePt NPs: MgO nanocomposite films[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2019: 46-51.
- [39] Marszalek K, Malek A, Winkowski P. The GdF<sub>3</sub>/MgF<sub>2</sub> bilayer as an antireflective narrow-band ultraviolet filter [J]. *Optica Applicata*, 2016, 46(2): 187-197.
- [40] Zhang Y A, Fan H Q, Li M M, et al. Ag/BiPO<sub>4</sub> heterostructures: synthesis, characterization and their enhanced photocatalytic properties[J]. *Dalton Transactions*, 2013, 42(36): 13172-13178.
- [41] Tian H L, Fan H Q, Ma J W, et al. Pt-decorated zinc oxide nanorod arrays with graphitic carbon nitride nanosheets for highly efficient dual-functional gas sensing [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 341: 102-111.
- [42] Sterrer M, Berger T, Diwald O, et al. Energy transfer on the MgO surface, monitored by UV- induced H<sub>2</sub> chemisorption[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2003, 125(1): 195-199.
- [43] Agrawal A, Cho S H, Zandi O, et al. Localized surface plasmon resonance in semiconductor nanocrystals[J]. *Chemical Reviews*, 2018, 118(6): 3121-3207.
- [44] Mayer K M, Hafner J H. Localized surface plasmon resonance sensors[J]. *Chemical Reviews*, 2011, 111(6): 3828-3857.
- [45] Fang J W, Fan H Q, Ma Y, et al. Surface defects control for ZnO nanorods synthesized by quenching and their anti-recombination in photocatalysis[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 332: 47-54.
- [46] Li J, Fan H Q, Jia X H, et al. Enhanced blue-green emission and ethanol sensing of Co-doped ZnO nanocrystals prepared by a solvothermal route[J]. *Applied Physics A*, 2010, 98(3): 537-542.