

特约专栏

蝶翅为模板功能材料光吸收特性的研究

蔡年进¹, 张 旺¹, 田军龙², 张 荻¹

(1. 上海交通大学材料学院 金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200240)

(2. 湘潭大学物理与光电工程学院, 湖南 湘潭 411105)

摘 要: 阐述了以裳凤蝶前翅(T_ FW)和宽带凤蝶前翅(P_ FW)为模板, 通过化学合成方法制备了具有三维减反射准周期性微纳结构的金属和碳基金属功能材料。通过 XRD 检测复合材料的组分和晶型; 通过 SEM 和 TEM 观察了复合材料的表面形貌; 通过 HRTEM 和 SAED 检测了复合材料的晶体结构。结果表明: 复合材料具有优异的加强宽波段红外吸收性能。与性能优异的太阳光吸收材料 BlueTec eta plus_ Cu 相比, 对 300 ~ 2500 nm 波长光, 平均光吸收有所增强; 对 2.5 ~ 15 μm 中红外光, 平均光吸收增强几十倍。此外也测试了裳凤蝶前翅和宽带凤蝶前翅的空白实验做对照, 说明了性能优异的功能材料与性能优异的功能结构相结合, 实现性能的提升、扩展及革新的可行性。

关键词: 蝶翅; 光吸收; 红外; 结构; 功能

中图分类号: TB17 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2016)09-0651-07

The Absorption of Functional Composite Material Synthesized by Chemical Synthesis Method in the Template of Butterfly-Wings

CAI Nianjin¹, ZHANG Wang¹, TIAN Junlong², ZHANG Di¹

(1. State Key Laboratory of Metal Matrix Composites, School of Material Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

(2. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: Setting butterfly-wings as template are used to fabricate the functional composite materials-metal and carbon based metal with 3 - D antireflection quasi-periodicity micro structure. XRD is used to investigate the constituent of functional materials, and we investigate the morphologies of them by SEM and TEM. Besides, we observe the crystal structure by HRTEM and SAED. The result exhibits: the functional materials possess excellent property in enhancing absorption of wide-band infrared. Compared with excellent absorption material named BlueTec eta plus_ Cu, the functional material has a partial absorption enhancement of 300 to 2500 nm wavelength light and has a huge absorption enhancement of 2.5 to 15 μm wavelength light. What's more, this study also detects the absorption of butterfly-wings only. All this result shows that it is feasible to combine excellent functional material with excellent functional structure to achieve the huge enhancement of property.

Keywords: butterfly-wings; absorption; infrared; structure; function

1 前 言

目前太阳能的利用方式主要有光热转换、光伏转换

和光化学转换三种方式。无论是采用哪种能量转换方式, 首要任务就是最大限度地吸收并捕捉进入系统的太阳光子。根据光吸收机理的差异, 目前光功能材料的吸收表面可分为两大类^[1], 如图1所示, 分别是: 本征吸收型(I型)和结构吸收型(S型)。本征吸收型即为材料本身具有一定的光吸收性能, 可将入射光中波长小于其禁带宽度的光子能量吸收转换。而结构吸收型则是通过调控吸收表面的结构特性, 从而最大程度地减少反射率, 提升光子吸收的几率。如目前常采用的硅晶片表面粗糙结构(S-2型)^[2]就是通过表面腐蚀粗糙化之后实现更多几率的漫反射^[3], 从而部分地增强光吸收效果。

收稿日期: 2016-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(51572169); 上海市启明星基金(16QA1402400)

第一作者: 蔡年进, 男, 1992年生, 硕士研究生

通讯作者: 张 旺, 男, 1981年生, 副研究员, 硕士生导师,

Email: wangzhang@sjtu.edu.cn

张 荻, 男, 1957年生, 教授, 博士生导师, Email:

zhangdi@sjtu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2016.09.02

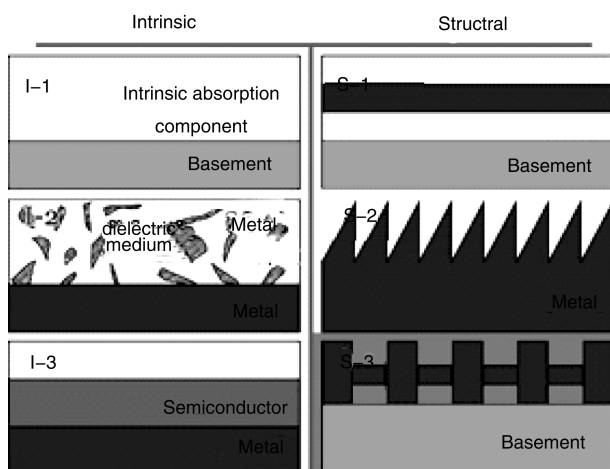


图 1 光功能材料吸收表面的分类: 左栏本征吸收型(I 型), 右栏结构吸收型(S 型)

Fig. 1 Classification of photon functional material surface;
(left) Intrinsic absorption I-type, (right)
Structural absorption S-type

这些无序化表面结构缺乏对表面形貌精确地控制和纹理结构的优化处理, 尤其缺乏对结构与光吸收增强机理的数理解析, 导致目前的研究多局限于工艺研究。因此, 最近的重点研究^[4]重点转为基于有序光学结构(S-3 型), 尤其是基于三维光学结构^[5,6]的高效光吸收结构。但是这些有序结构与组分之间的匹配关系以及低成本制备方面与实际应用的差距仍有较大距离^[4]。而且对于太阳能存在的光谱分布范围广和入射角度偏大等先天不利因素, 如何针对性地制备在宽谱广角入射条件下仍保持有较高光吸收能力的吸收结构^[7], 是目前高效利用太阳能的极大挑战。

目前多采用如下几种方法制备光吸收表面结构^[1,8]: 气相沉积法、气液固(VLS)生长法、刻蚀法、合金定向凝固法和化学腐蚀法等。尽管目前已针对这些太阳能吸收材料的表面光学结构进行了多方面的研究^[8], 并取得了一定的进展, 但仍未能从根本上简化这些光吸收材料的制备工艺以及改善其相对较低的光吸收效率。

如何设计和制备高效光吸收仿生宽谱广角光功能材料, 研究人员将研究视线转向自然, 从中汲取研究灵感。其中某些生存在高海拔或高纬度较寒冷地区的深色蝴蝶物种表现出更为高效经济的光吸收能力, 因此较其他物种有着更高的存活率和更长的活跃时间^[9,10]。显微分析揭示这些蝴蝶鳞片具有特殊的表面微纳结构——准蜂窝复合结构。相对于目前厚度在数十微米级别的人工光吸收材料^[11], 这种光吸收结构能够使蝴蝶翅黑鳞片在更薄(约低一个数量级、仅几个微米)的厚度下实现近 99% 的光吸收性能^[12], 几乎实现了入射光线的“有来无回”, 但这种经过长期自然进化形成的三维精细分级结构是目前

利用人工方法无法制备的。本文提出直接利用自然界具有增强光吸收微纳结构的蝶翅为仿生制备模板, 通过组分设计与耦合转变, 在保留蝶翅三维精细结构的同时, 将生物原有的有机材质替换为具有光能吸收和相应光能转换性质的材料, 合成制备一系列兼具自然生物高效光吸收微纳结构和置换所得光功能组分的光功能材料, 实现在光吸收及光能转换材料研究领域的“光吸收结构的有序化”和“光吸收与光转换功能的一体化”。

金属纳米结构材料的等离子体共振能使电磁场聚集, 加强金属表面的电磁场分布^[13]。金属表面电磁场聚集、加强, 对材料的物理、化学性能具有很大的影响, 从而被广泛应用于响应传感^[14]、加强光谱信号^[15]、促进催化反应^[16]、光热治疗^[15]、医学成像^[17]、表面增强拉曼散射^[18]、表面加强可见光吸收^[19]和表面加强红外吸收^[20]等。然而与其他应用相比, 由于当今技术的限制, 设计和制备具有宽波段红外响应的金属纳米结构具有一定的难度, 因此金属等离子体加强红外光吸收目前被关注的较少^[21]。当等离子体被激发产生等离子体共振时, 电磁场加强达到最大。可是, 大多数金属纳米结构材料的等离子体共振激发电磁波聚集在可见和紫外光波段, 从而限制了等离子体共振在红外光波段的应用。然而, 金属等离子体共振波长受金属纳米材料的结构和成分的影响, 其等离子体共振波长是可调的^[22]。因此, 等离子体共振波长可调节至一个宽波段区域, 甚至到近红外波段^[23]。此外, 等离子体共振波长还受近邻等离子体共振相互作用^[24]和等离子体成分与结构相互作用的影响^[25]。于是, 大量的工作通过等离子成分与相应功能结构的耦合来加强、调节、扩展, 甚至更新材料的性能^[25]。然而, 应用传统技术如自发外延形核、化学合成、形核点上第二相或第三相成分长大、对流辅助毛细管自组装等, 都很难自组装等离子体共振纳米材料形成宏观尺度的薄膜或块体材料, 特别是具有相应功能微纳结构的宏观尺度材料^[26]。

为了实现等离子材料与三维亚微米减反射准光子结构的耦合, 调节、加强等离子体共振, 本文结合化学合成和仿生遗态材料制备技术, 采用裳凤蝶前翅(T_FW)和宽带凤蝶前翅(P_FW)这两种具有蝶翅减反射准周期性微纳结构(AQPS)吸光结构的黑色蝶翅作为模板, 制备了具有三维减反射准周期性微纳结构的金属、碳基金属功能材料, 表现出优异的加强宽波段红外吸收性能。

2 实验方法

2.1 具有蝶翅金属功能材料的制备

具体步骤如下:

(1)将氯化后的 T_FW 和 P_FW 分别置于金、银、铜化学镀液中进行化学镀, 并且保持 30 ℃ 沉积温度。然

后再采用去离子水清洗。其详细的化学镀液成分及浸渍时间如表1所示^[27]；

(2)将浸渍好的金属碟翅进行真空干燥：放入室温(25℃)的真空干燥箱中，抽真空干燥。

表1 化学沉积液成分及浸渍时间、温度^[27]

Table 1 The constituent of chemical deposition liquid, dipping time and temperature^[27]

Material	Chemical deposition liquid	Time(min)	Temperature(℃)
Gold	Chloroauric acid(1 g), Sodium chloride (0.6 g), tartaric acid (0.4 g), sodium hydroxide (5.14 g), anhydrous ethanol(7 ml), deionized water (100 ml) ^[28]	15	30
Silver	Silver nitrate (1 g), ammonia (2 ml), sodium potassium tartrate (5 g), deionized water (100 ml) ^[29]	15	30
Copper	Copper sulfate (3 g), sodium hydroxide (4 g), sodium potassium tartrate (14 g), formaldehyde (10 ml), deionized water (100 ml) ^[30]	15	30

2.2 具有蝶翅碳基金属功能材料的制备

结合 Zhang W 对原始蝶翅的热重分析^[31]，本研究选择 450℃ 作为蝶翅模板的碳化温度，并取得很好的碳化效果和蝶翅微纳结构的保持效果。制备 Ag_T_FW 的工艺如下：

(1)将上文制备的 Ag_T_FW 置于真空管式炉中，通过抽真空，使炉腔保持真空环境。采用 3℃/min 的升温速度，升温至 450℃，并在 450℃ 的温度下保温 2 h。然后自然冷却至室温；

(2)当真空管式炉冷却至室温后，取出碳化后的 Ag_T_FW(Ag@C_T_FW)，放入真空干燥箱中保存，以避免 Ag@C_T_FW 氧化。

3 微结构及物相表征

图 2a~2c 为制备的金、银、铜“蝶翅”XRD 衍射图谱。由图 2a 所示，制备的金“蝶翅”表面，化学沉积的金纳米颗粒的晶体结构为立方相。位于 38.34°、44.56°、64.86°、77.66°、81.98° 的 XRD 峰值分别对应于立方相金的(111)、(200)、(220)、(311)、(222)晶面(JCPDS card No.04-0784)。由图 2b 所示，制备的银“蝶翅”表面，化学沉积的银纳米颗粒的晶体结构为立方相。位于 38.42°、44.60°、64.70°、77.74°、81.92° 的 XRD 峰值分别对应于立方相银的(111)、(200)、(220)、(311)、(222)晶面(JCPDS card No.04-0783)。由图 2c 所示，制备的铜“蝶翅”表面，化学沉积的铜纳米颗粒的晶体结构为立方相。位于 43.54°、50.56°、74.60° 的 XRD 峰值分别对应于立方相铜的(111)、(200)、(220)晶面(JCPDS card No.65-9743)。图 2a~2c 中，精细的 XRD 衍射峰说明了其分别沉积的金、银、铜纳米颗粒的结晶性均比较好。

如图 2d 所示，制备的 Ag_T_FW 和 Ag@C_T_FW 表面化学沉积的银纳米颗粒的晶体结构为立方相。位于 38.42°、44.60°、64.70°、77.74°、81.92° 的 XRD 峰值分别对应于立方相银的(111)、(200)、(220)、(311)、

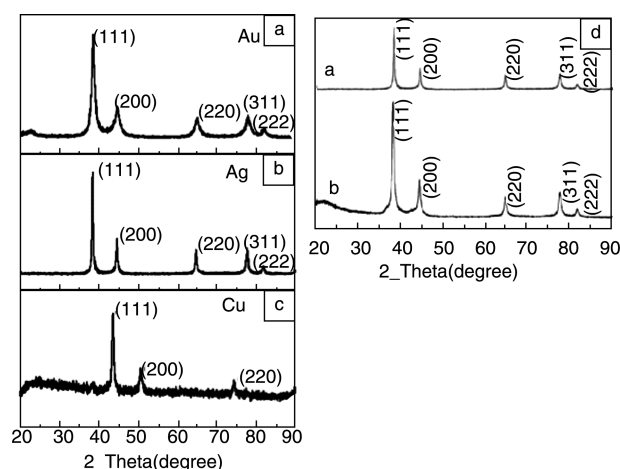


图2 (a~c)化学沉积时间为15 min的金、银、铜“蝶翅”的XRD图谱；(d)a: Ag_T_FW 和 b: Ag@C_T_FW 的XRD图谱

Fig.2 XRD patterns of (a) Au butterfly wing, (b) Ag butterfly wings and (c) Cu butterfly wing, when the deposition time lasted for 15 min; (d) XRD patterns of a: Ag_T_FW and b: Ag@C_T_FW

(222)晶面(JCPDS card No. 04-0783)。其精细的XRD衍射峰说明了 Ag_T_FW 和 Ag@C_T_FW 微结构表面沉积的银纳米材料具有较好的结晶性。对比 Ag_T_FW 和 Ag@C_T_FW 的XRD衍射峰位置发现，经过烧结后银纳米材料的XRD衍射峰位置几乎没有变动，从而说明了此烧结工艺并没有改变原来的银纳米材料的物相，依然保持为立方相银纳米材料。同时，从 Ag@C_T_FW 的XRD衍射图谱可以发现在 20° 附近位置具有一个无定型碳的衍射峰，从而说明了经过碳化后，甲壳素/黑色素基材成功地被转化为了无定型碳基材。

图 3a1~3b3 为 T_FW 和 P_FW 在化学沉积金、银、铜纳米材料后的 SEM 照片。当沉积时间为 15 min 的时候，T_FW 的金、银、铜“蝶翅”(Au_T_FW、Ag_T_FW、Cu_T_FW)和 P_FW 的金、银、铜“蝶翅”(Au_P_FW、

Ag_P_FW、Cu_P_FW) 均能很好得保留原始 T_FW 和 P_FW 的微纳精细结构。甚至连三角屋顶状脊结构两侧准周期性排列的微肋结构均能很好得保留。结合图 2 的 XRD 衍射谱分析及图 3a1 ~ b3 的 SEM 形貌分析, 说明了仅对甲壳素基原始蝶翅进行氨化处理后, 再采用化学合成、化学沉积技术, 金属纳米颗粒可均匀沉积、覆盖在蝶翅微纳结构表面, 紧密排列聚集成纳米薄膜, 成功制备蝶翅微纳结构形貌保持完好的金属“蝶翅”。

通过 SEM 和 TEM, 对 Ag_T_FW 和 Ag@C_T_FW 的微纳结构形貌进行了对比研究(图 3a ~ 3d)。由图 3a 所示, 银纳米颗粒被沉积在蝶翅 AQPS 的表面, 并相互聚集在脊、微肋、窗口等微纳结构表面形成金属薄膜。减反射周期性分布的三角屋顶状脊结构、脊两侧准周期性

排列的微肋结构及窗口结构均保留完好。由图 3b 所示, 与 Ag_T_FW 相比, Ag@C_T_FW 的微纳精细结构在经过碳化后几乎没有发生改变, T_FW 的 AQPS 被完好得保留。由图 3c 和 3d 所示, 可更加清晰地观察到脊表面、窗口壁表面上及微肋表面上沉积的银纳米颗粒, 并且紧密排列聚集成金属薄膜。由图 3d 所示, 沉积的银纳米颗粒的粒径约 20 nm。此外, 如 Ag@C_T_FW 的 SAED 所示, 其明显的环状衍射图像, 进一步说明了 Ag@C_T_FW 表面沉积的银纳米材料为多晶银材料, 并且与 XRD 图谱吻合得很好。其衍射环分别对应于 (111)、(200)、(220) 和 (311) 晶面(如图 3(c) 插图所示)。同时, 从 HRTEM 图可清晰地观测到晶面间距 $d_{\text{Ag}(111)} = 0.24 \text{ nm}$ 的高分辨晶格条纹。

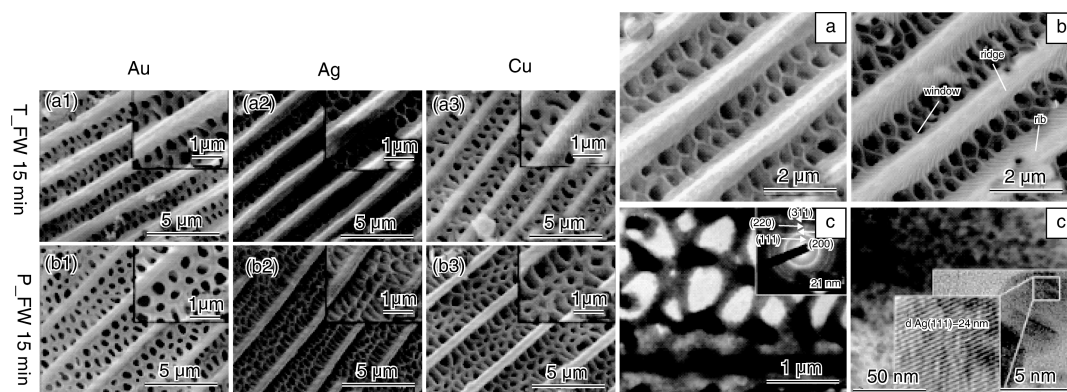


图 3 (a1 ~ a3) 化学沉积时间为 15 min 时的金、银、铜蒙凤蝶前翅的 SEM 照片; (b1 ~ b3) 化学沉积时间为 15 min 时的金、银、铜的宽带凤蝶前翅的 SEM 照片; (a) Ag_T_FW 和 (b) Ag@C_T_FW 的 SEM 照片, (c) 和 (d) Ag@C_T_FW 的 TEM 照片, 其中 (c) 中插图是 Ag@C_T_FW 的透射衍射环照片, (d) 中插图是 Ag@C_T_FW 的高分辨 TEM 照片

Fig. 3 SEM images of the butterfly wings loaded of noble metals; Au, Ag and Cu metal wings of T_FW with the deposition time of 15 min (a1 ~ a3); Au, Ag and Cu metal wings of P_FW with the deposition time of 15 min (b1 ~ b3). SEM images of (a) Ag_T_FW and (b) Ag@C_T_FW. TEM images of Ag@C_T_FW (c ~ d), the inset of (c) is the SAED image of Ag@C_T_FW, the inset of (d) is the HRTEM image of Ag@C_T_FW

4 光学性能

图 4a, 4b 分别为 Au_T_FW、Ag_T_FW、Cu_T_FW、Au_P_FW、Ag_P_FW 和 Cu_P_FW 在 300 ~ 2500 nm 和 2.5 ~ 15 μm 光波长区域内的光吸收图谱。通过光吸收图谱对比分析可见, 以 T_FW 为模板的金、银、铜“蝶翅”的光吸收性能均分别优于以 P_FW 为模板的金、银、铜“蝶翅”。其中, 在宽波段红外区域, 金、银、铜“蝶翅”的光吸收性能优异程度为: 银“蝶翅” > 铜“蝶翅” > 金“蝶翅”。这是由于与金、铜纳米材料相比, 银纳米材料的等离子体激发最为强烈^[32,33], 且近邻等离子体共振相互作用促使加强宽波段红外吸收^[24]。此外, Ag_T_FW 和 Ag_P_FW 在 322 nm 光波长附近均具有一个明显的由于银纳米材料等离子体共振产生的光吸收峰^[32](图 4a)。

然而由于金、铜纳米材料的等离子体共振峰相对较弱, 且原始黑色吸收光蝶翅在可见光波区域具有高的光吸收性能, 因此在光吸收背景下, 其等离子体共振吸收峰表现得不明显。与图 4e 中 T_FW 和 P_FW 在近红外光波段的光吸收图谱相比, Au_T_FW、Cu_T_FW、Au_P_FW、和 Cu_P_FW 均具有加强宽波段红外吸收性能, 说明了金、铜纳米材料近邻等离子体相互作用的存在, 从而加强宽波段红外吸收。由图 4a 和 4b 所示, 在整个近红外光波段及 2.5 ~ 15 μm 中红外光波段, Ag_T_FW 均具有最优异的宽波段红外吸收性能。这是由于 Ag_T_FW 耦合了高等离子体激发特性的银纳米材料^[32]、近邻银纳米颗粒等离子体相互作用和性能优异的减反射光吸收结构(T_FW 的 AQPS)。这也是为何在进一步优化宽波段红外吸收功能材料的研究中, 采用 Ag_T_FW 作为基材进行碳化处理。

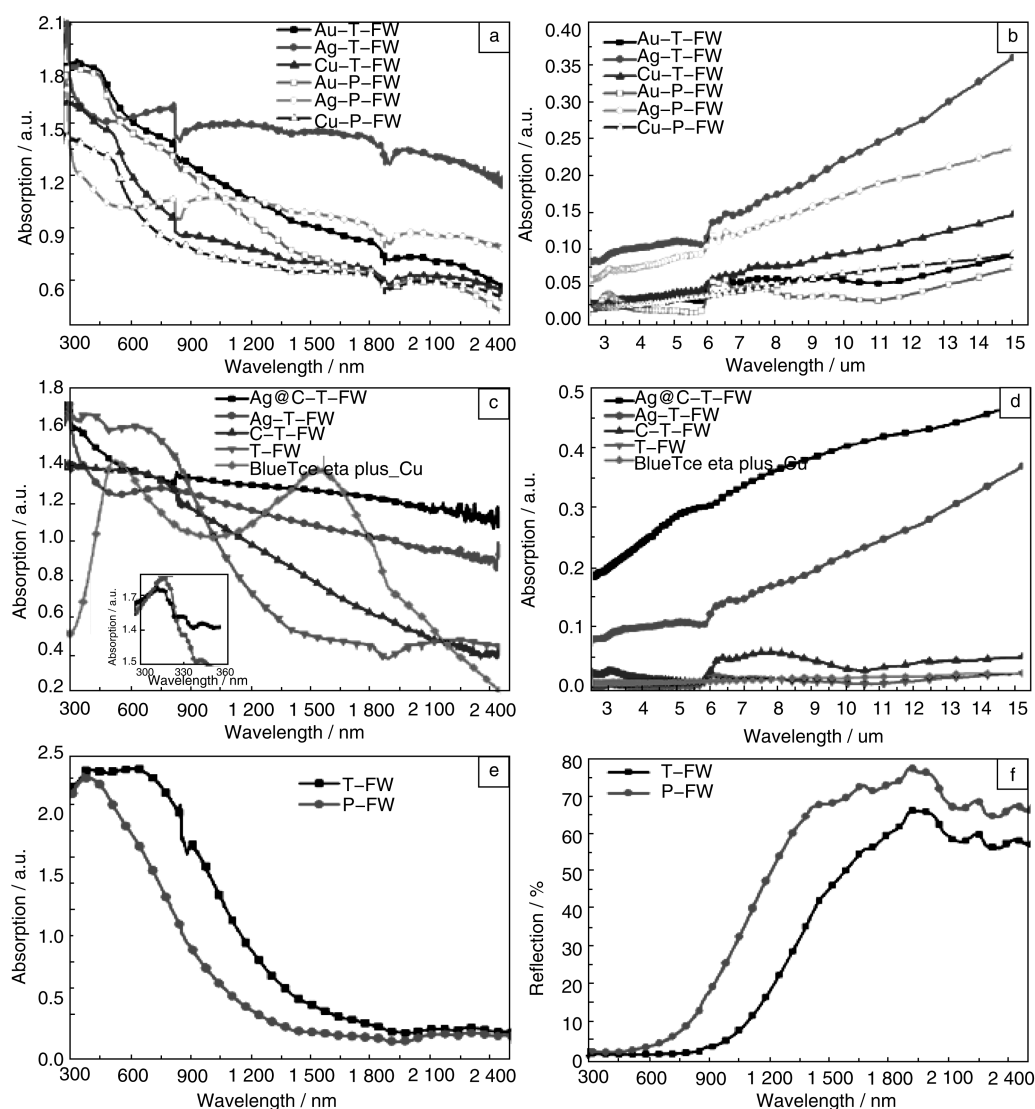


图4 Au_T_FW、Ag_T_FW、Cu_T_FW、Au_P_FW、Ag_P_FW 及 Cu_P_FW 在波长范围为300 ~ 2500 nm (a) 和 2.5 ~ 15 μm (b)的光吸收图谱; Ag@C_T_FW、Ag_T_FW、C_T_FW、T_FW 及 BlueTec eta plus_Cu 在波长范围为 300 ~ 2500 nm(c) 和 2.5 ~ 15 μm (d)的光吸收图谱; T_FW 和 P_FW 在波长为 300 ~ 2500 nm范围内的光吸收图谱(e), 光反射图谱(f)

Fig. 4 Absorption spectra of Au_T_FW, Ag_T_FW, Cu_T_FW, Au_P_FW, Ag_P_FW and Cu_P_FW over the wavelength ranges of 300 ~ 2500 nm (a) and 2.5 ~ 15 μm (b); absorption spectra of Ag@C_T_FW, Ag_T_FW, C_T_FW, T_FW and BlueTec eta plus_Cu over the wavelength ranges of 300 ~ 2500 nm (c) and 2.5 ~ 15 μm (d); the absorption spectra(e) and reflection spectra(f) of the forewings of *T. helena* and *P. nephelus* over the wavelength range of 300 ~ 2500 nm, respectively

为了研究具有 AQPS 的金属、碳基金属“蝶翅”的光吸收性能, 本文对比了 Ag@C_T_FW、Ag_T_FW、C_T_FW、T_FW 及 BlueTec eta plus_Cu 在波长为300 ~ 2500 nm 和 2.5 ~ 15 μm 范围内的光吸收性能。BlueTec eta plus_Cu 为国际著名太阳能集热器生产公司 BlueTec GmbH & Co KG, Hese Germany 生产的太阳能光吸收及光热转换铜基蓝膜, 在 0.29 μm ~ 2.5 μm 光波段具有优异

的光吸收及光热转换性能, 其太阳能吸收比高达 0.953, 热发射比仅为 0.047^[34]。如图 4c 所示, T_FW 在可见光波段具有优异的光吸收性能, 甚至高于 BlueTec eta plus_Cu 在可见光波段的光吸收特性。这是由于 T_FW 耦合了 AQPS 光吸收结构和具有优异的可见光吸收性能的甲壳素/黑色素复合材料^[35,36]。然而与 T_FW 相比, 经过与 Ag@C_T_FW 相同碳化工艺碳化后的 T_FW(C_T_FW)在

红外光波段具有较优异的光吸收性能,从而说明了,与甲壳素/黑色素复合材料相比,无定型碳具有更优异的红外光吸收性能。从图 4c 及其插图可见,Ag@C_TFW 和 Ag_TFW 分别在 312 nm 和 318 nm 波长位置具有明显的光吸收峰。并且由文献^[37]可知这些吸附峰来自于银纳米颗粒的等离子体共振吸收。在近红外区域(图 4c 和 4d),与 C_TFW 和 TFW 相比,Ag_TFW 具有更为优异的光吸收性能。其主要原因有如下:①银纳米颗粒的等离子体振荡,将入射光波束缚在等离子体材料表面,促进光波电磁场局域汇集放大,增强银纳米颗粒表面光波电磁场强度,从而促进光吸收;②近邻银纳米颗粒的等离子体振荡相互作用,加强宽波段红外吸收^[24,38];③等离子体振荡、近邻等离子体振荡相互作用与 TFW 的 AQPS 耦合,进一步加强宽波段红外吸收。然而与 Ag_TFW 相比,Ag@C_TFW 具有更为优异的宽波段红外吸收性能。这是由于与 TFW 的甲壳素/黑色素复合材料相比,Ag@C_TFW 的无定型碳基材料具有更为优异的红外光吸收性能。

因此与 Ag_TFW 相比,Ag@C_TFW 实现了更为优异的材料与结构的耦合,从而具备更为优异的性能。也说明了通过优化等离子体振荡及相互作用、功能结构、基板材料,可实现功能材料的宽波段红外光吸收性能的进一步优化。与性能优异的太阳光吸收材料 BlueTec eta plus_Cu 相比,在 300 ~ 2500 nm 光波长区域,Ag@C_TFW 的平均光吸收性能增强了 42.75%;在 2.5 ~ 15 μm 光波长区域,其平均光吸收强度是 BlueTec eta plus_Cu 的光吸收强度的 28.7 倍。从而进一步体现了 Ag@C_TFW 优异的宽波段红外吸收性能。

5 结 论

本文结合化学合成和仿生遗态材料制备技术,采用裳凤蝶前翅(TFW)和宽带凤蝶前翅(PFW)这两种具有蝶翅减反射准周期性微纳结构(AQPS)吸光结构的黑色蝶翅作为模板,制备了具有三维减反射准周期性微纳结构的金属、碳基金属功能材料,表现出优异的加强宽波段红外吸收性能。

所制备的 Ag_TFW 和 Ag@C_TFW 实现了等离子体振荡与 AQPS 耦合,具有优异的加强宽波段红外吸收性能。与性能优异的太阳光吸收材料 BlueTec eta plus_Cu 相比,在 300 ~ 2500 nm 光波长区域,Ag@C_TFW 的平均光吸收性能加强了 42.75%;在 2.5 ~ 15 μm 光波长区域,其平均光吸收强度是 BlueTec eta plus_Cu 的光吸收强度的 28.7 倍。

提出了等离子体振荡、近邻等离子体相互作用与

AQPS 耦合进一步加强宽波段红外吸收机制。说明了性能优异的功能材料与性能优异的功能结构相结合,能够实现材料性能的进一步提升。

参考文献 References

- [1] Kennedy C E. *Other Information; PBD* [M]. International Society of Offshore and Polar Engineers Publishing, 2002: 1286 ~ 1344.
- [2] Pudasaini P R, Ayon A A. *Springer* [J], 2014, 190: 497 ~ 514.
- [3] Zhao Jianhua, Wang Aihua, Campbell P, et al. *IEEE Transactions on Electron Devices* [J], 1999, 46(10): 1978 ~ 1983.
- [4] Sheng Xing, Broderick L Z, Kimerling L C. *Optics Communications* [J], 2014, 314: 41 ~ 47.
- [5] Upping J, Bielawny A, Wehrspohn R B, et al. *Adv Mater* [J], 2011, 23(34): 3896 ~ 900.
- [6] O'Brien P G, Kherani N P, Chutinan A, et al. *Advanced Materials* [J], 2008, 20(8): 1577 ~ 1582.
- [7] Teperik T V, Garcia de Abajo F J, Borisov A G, et al. *Nat Photon* [J], 2008, 2(5): 299 ~ 301.
- [8] 太阳光谱选择性吸收膜系设计制备及测评(*The Design, Preparation and Evaluation of the Solar Spectral Selective Absorbing Film System*) [M]. Translated by Shi Yueyan and Na Hongyue (史月艳、那鸿悦译). Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [9] Van Dyck H, Matthysen E, Dhondt A A. *Animal Behaviour* [J], 1997, 53(1): 39 ~ 51.
- [10] Schmitz Helmut. *Journal of Thermal Biology* [J], 1994, 19(6): 403 ~ 412.
- [11] Brown R J C, Brewer P J, Milton M J T. *Journal of Materials Chemistry* [J], 2002, 12(9): 2749 ~ 2754.
- [12] Vukusic P, Sambles J R, Lawrence C R. *Proceedings of the Royal Society B - Biological Sciences* [J], 2004, 271 (Suppl_4): S237 ~ S239.
- [13] Jiang Ruibin, Li Benxia, Fang Caihong, et al. *Advanced Materials* [J], 2014, 26(31): 5274 ~ 5309.
- [14] Ng Binghao, Wu Jianfeng, Hanham S M, et al. *Advanced Optical Materials* [J], 2013, 1(8): 543 ~ 548.
- [15] Gobin A M, Lee M Ho, Halas N J, et al. *Nano Letters* [J], 2007, 7(7): 1929 ~ 1934.
- [16] Larsson E M, Langhammer C, Zori, et al. *Science* [J], 2009, 326(5956): 1091 ~ 1094.
- [17] Aioub M, Kang Bin, Mackey M A, et al. *The Journal of Physical Chemistry Letters* [J], 2014, 5(15): 2555 ~ 2561.
- [18] Sivapalan S T, DeVetter B M, Yang T K, et al. *ACS Nano* [J], 2013, 7(3): 2099 ~ 2105.
- [19] Chen Xi, Jia Baohua, Saha J K, et al. *Nano Letters* [J], 2012, 12(5): 2187 ~ 2192.
- [20] Cheng Chengwen, Abbas M N, Chiu Chaowei, et al. *Optics Express* [J], 2012, 20(9): 10376 ~ 10381.
- [21] Brown L V, Zhao Ke, King N, et al. *Journal of the American Chemical Society* [J], 2013, 135(9): 3688 ~ 3695.
- [22] Wang Hui, Brandl D W, Nordlander P, et al. *Accounts of Chemical Research* [J], 2007, 40(1): 53 ~ 62.

- [23] Huang Xiaohua, Neretina S, El - Sayed M A. *Advanced Materials*[J], 2009, 21(48): 4880 - 4910.
- [24] Le Fei, Brandl D W, Urzhumov Y A, *et al.* *ACS Nano*[J], 2008, 2(4): 707 - 718.
- [25] Chanda D, Shigeta K, Truong T, *et al.* *Nat Commun*[J], 2011, 2: 479.
- [26] Jägeler - H T, Cordeiro J, Lecarme O, *et al.* *The Journal of Physical Chemistry C*[J], 2013, 117(44): 23126 - 23132.
- [27] Tan Yongwen, Gu Jiajun, Zang Xining, *et al.* *Angewandte Chemie - International Edition*[J], 2011, 50(36): 8307 - 8311.
- [28] Dong Wen, Dong Han, Wang Zhenlin, *et al.* *Advanced Materials*[J], 2006, 18(6): 755 - 759.
- [29] Chen Z, Zhan P, Wang Z L, *et al.* *Advanced Materials*[J], 2004, 16(5): 417 - 422.
- [30] Tal A, Chen Yunsheng, Williams H E, *et al.* *Optics Express*[J], 2007, 15(26): 18283 - 18293.
- [31] Zhang Wang(张 旺). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [32] Evanoff D D Jr, Chumanov G. *Chemphyschem*[J], 2005, 6(7): 1221 - 1231.
- [33] Yang Chang, Ma Lun, Zou Xiaojun, *et al.* *Cancer Nanotechnol*[J], 2013, 4(4 - 5): 81 - 89.
- [34] [http://www. bluetecgermany. com/en/Reflection/Products](http://www.bluetecgermany.com/en/Reflection/Products).
- [35] Herman A, Vandenbem C, Deparis O, *et al.* *Proc. of SPIE*[J], 2011(8094): 80940H1 - 80940H12.
- [36] Zhao Qibin, Guo Xingmei, Fan Tongxiang, *et al.* *Soft Matter*[J], 2011, 7(24): 11433 - 11439.
- [37] Metraux G S, Mirkin C A. *Advanced Materials*[J], 2005, 17(4): 412 - 412.
- [38] Ye Zhuo, Chaudhary S, Kuang Ping, *et al.* *Optics Express*[J], 2012, 20(11): 12213 - 12221.

(编辑 惠 琼)