

基于等离激元多重杂化效应的光吸收结构

杨帅 毛海央 鲍爱达 郭鑫 李锐锐 杨宇东 石梦 陈大鹏

Light absorbing structures based on plasmon multi-hybrid effect

Yang Shuai Mao Hai-Yang Bao Ai-Da Guo Xin Li Rui-Rui Yang Yu-Dong Shi Meng Chen Da-Peng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 047802 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201512

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201512>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

等离激元增强的石墨烯光吸收

Enhanced optical absorption of graphene by plasmon

物理学报. 2020, 69(6): 067801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191645>

基于塔姆激元-表面等离极化激元混合模式的单缝加凹槽纳米结构的增强透射

Enhanced optical transmission by exciting hybrid states of Tamm and surface plasmon polaritons in single slit with multi-pair groove nanostructure

物理学报. 2018, 67(10): 107104 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180117>

介电常数近零模式与表面等离激元模式耦合实现宽带光吸收

Broadband absorption caused by coupling of epsilon-near-zero mode with plasmon mode

物理学报. 2018, 67(20): 207301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181106>

等离激元能带结构与应用

Plasmonic band structures and its applications

物理学报. 2020, 69(15): 157301 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200193>

基于人工表面等离激元结构的全向隐身

Omnidirectional cloaking based on spoof surface plasmonic structure

物理学报. 2019, 68(15): 154101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190283>

基于等离激元纳米结构非线性响应的超快光开关及脉冲激光器

Ultrafast optical switches and pulse lasers based on strong nonlinear optical response of plasmon nanostructures

物理学报. 2020, 69(18): 189101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200456>

基于等离子激元多重杂化效应的光吸收结构*

杨帅¹⁾²⁾ 毛海央^{2)3)†} 鲍爱达^{1)‡} 郭鑫¹⁾ 李锐锐¹⁾²⁾杨宇东²⁾ 石梦²⁾ 陈大鹏²⁾

1) (中北大学仪器与电子学院, 太原 030051)

2) (中国科学院微电子研究所, 集成电路先导工艺研发中心, 北京 100029)

3) (江苏创芯海微科技有限公司, 无锡 214001)

(2020 年 9 月 10 日收到; 2020 年 10 月 19 日收到修改稿)

近年来, 以聚合物为代表的高分子材料由于具有比其他光吸收材料 (如半导体材料、碳基材料以及贵金属纳米材料) 更好的柔性和粘弹性而受到广泛关注. 本文基于等离子体再聚合技术和磁控溅射工艺在聚合物材料层上制备了具有等离子激元多重杂化效应的光吸收结构, 该结构具有宽谱高吸收特性. 该结构的制备工艺简单易行, 对不同聚合物材料具有通用性, 在光学器件领域具有广泛的应用前景.

关键词: 等离子体再聚合, 复合纳米森林结构, 光吸收结构, 等离子激元多重杂化

PACS: 78.68.+m, 78.66.Sq, 78.40.-q, 73.20.Mf

DOI: 10.7498/aps.70.20201512

1 引言

随着科技的不断发展, 人们对能源和环境质量的需求不断升高, 可再生能源之一——太阳能的开发和利用逐渐引起关注, 如太阳能蒸汽^[1,2]、太阳能脱盐^[3]、光催化^[4]和太阳能电池^[5-7]等的研究与开发. 然而, 当前各研究领域对太阳能的利用率一直处于较低水平^[8,9], 仍需要特定的光吸收材料或结构来捕获更多的光, 提高对太阳能的利用率. 目前, 常用的光吸收材料包括半导体材料^[10]、碳基材料^[11,12]以及贵金属纳米材料等^[13,14]. 其中, 半导体材料因其光电特性好而被广泛应用于光电探测领域中^[15,16]; 碳基材料由于其来源广、成本低和光热转换效率高优点被广泛应用于光热转换装置中^[17]; 贵金属纳米材料因其纳米级尺寸而具有不同于块体材料

的光学性质, 在催化、光吸收及磁性介质等方面有着潜在的应用价值^[18]. 近年来, 以聚合物为代表的高分子材料^[19]在光热领域呈现出了潜力. 相比于其他光吸收材料, 聚合物基底光吸收率低, 吸收带宽窄, 集中于可见光波段^[20,21], 例如导电聚合物聚 3-己基噻吩和富勒烯 6, 6-苯基 C61 丁酸甲酯^[22]、嵌有银纳米粒子的聚 3-己基噻吩薄膜^[23]. 因此, 需要在聚合物材料层上制备光吸收结构, 以提高聚合物的光吸收能力.

近几十年来, 研究人员设计了不同的光学结构, 常用光吸收材料的吸收率得到了有效的提高, 例如, 采用飞秒激光刻蚀表面来制备具有微米纳米锥的黑硅使其实现了约 90% 的光吸收^[24]; 采用电子束蒸发与退火工艺相结合制备表面随机分布的不规则金纳米颗粒的光吸收层, 实现了可见光 95% 的高吸收^[25]等. 然而, 这些光吸收结构的制备工艺

* 国家自然科学基金 (批准号: 61771467)、广东省重点领域研发计划 (批准号: 2019B010117001) 和中国科学院青促会项目 (批准号: 2018153) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: maohaiyang@ime.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: baoida@muc.edu.cn

并不适用于聚合物材料层, 其制备过程中高温等环境极易造成聚合物材料的损毁. 此外, 现有的聚合物光吸收结构制备工艺大多需要借助结构模板, 且工艺过程复杂, 例如旋涂聚酰亚胺 (PI) 溶液在涂有抗粘附层的具有纳米锥阵列结构的阳极氧化铝 (AAO) 模板上, 制备得到纳米锥结构 PI 薄膜^[26]. 因此, 急需一种简单易行的工艺可以在聚合物材料层上制备光吸收结构.

本文采用等离子体再聚合技术和磁控溅射工艺成功地在聚合物材料层上制备了一种具有等离子体多重杂化效应的光吸收结构, 其为纳米纤维森林与金属纳米颗粒的复合纳米森林结构, 在可见光到中红外波段可实现宽谱高吸收. 该光吸收结构的制备工艺简单快捷, 便于大面积的并行加工, 且该工艺对不同聚合物材料都具有通用性. 可以预见, 这种基于等离子体多重杂化效应的光吸收结构可广泛应用于需要有效吸收光的光学器件中.

2 实验及样品制备

2.1 实验及设备

在本文的实验中, 等离子体再聚合技术是在中国科学院微电子研究所的反应离子刻蚀机 (RIE-100) 中实现的. 复合纳米森林结构表面的金纳米颗粒是采用从北仪创新真空技术有限公司购置的磁控溅射台 (JPGF-400D) 制备的. 制备得到的纳米森林结构形态特征图像通过扫描电子显微镜 (日立 S-5500, SEM) 获得. 在测试实验中, 采用分光光度计 (安捷伦 Cary 7000) 来测量获得样品对光的反射 (R) 和透射 (T) 谱图.

2.2 纳米纤维森林结构的制备

纳米纤维森林结构的制备利用了等离子体再聚合技术. 本文以聚酰亚胺 (PI) 为例, 分别采用氧等离子体和氩等离子体轰击聚合物材料层的表面, 在经过物理、化学反应以及聚合物分子解离、再聚合过程, 形成纳米森林结构^[27], 图 1 给出了 PI 材料层表面经历的不同工艺步骤及其对应的表面形貌扫描电镜 (SEM) 照片. 其中, 图 1(a) 为原始 PI 材料层表面的 SEM 图. 在仅经过氧等离子体轰击处理 30 min 后, 材料表面形成了直径约为 50 nm 的纤维结构, 且结构具有高深度比, 呈大密度的森

林状分布, 如图 1(b) 所示; 然而仅采用氩等离子体轰击 30 min 后, 材料表面并未形成明显的纳米结构, 如图 1(c) 所示. 尽管单独采用氩等离子体轰击 PI 材料层表面无法形成明显的纳米结构, 但却能够使已经形成的纳米纤维结构变粗壮, 如图 1(d) 所示, 从其插图可以看出, 依次经过 30 min 氧和 30 min 氩等离子体轰击处理后, 可得到直径约为 300 nm 的纳米纤维森林结构. 在这个轰击过程中, 氧气和氩气的流量分别设置为 30 和 20 sccm ($1 \text{ sccm} = 1 \text{ mL/min}$), 射频功率设为 75 W, 腔体压强为 2.4 Pa.

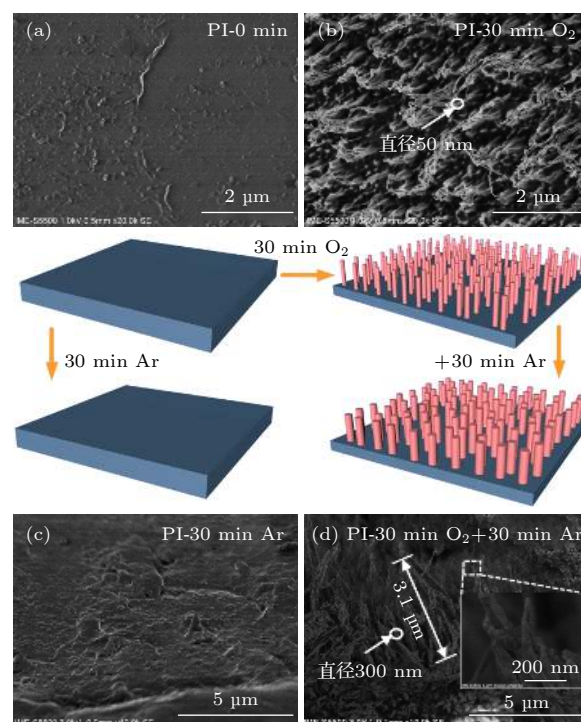


图 1 在 PI 表面上制备纳米纤维森林结构的工艺流程及各步骤所获得结构的 SEM 图 (a) 未经处理的 PI 表面 SEM 图; (b) 30 min 氧等离子体轰击后 PI 表面的 SEM 图; (c) 30 min 氩等离子体轰击后 PI 表面的 SEM 图; (d) 30 min 氧和 30 min 氩等离子体依次轰击后 PI 表面的 SEM 图

Fig. 1. Preparation process and SEM images of nanofiber forests on the surface of PI substrate: (a) SEM image of untreated PI surface; (b) SEM image of PI surface bombarded by 30 min oxygen plasma; (c) SEM image of PI surface bombarded by 30 min argon plasma; (d) SEM image of PI surface bombarded by 30 min oxygen and 30 min argon plasma.

由于氧等离子体直接轰击可以在 PI 表面形成纳米纤维森林结构, 因此通过调整氧等离子体轰击的时间, 可制备不同高度的纳米纤维森林结构, 图 2 所示为纳米纤维森林结构的平均高度与氧等离子体轰击时间之间的关系曲线, 由图可以看出, 随着

氧等离子体轰击时间的增加, 纳米纤维森林结构的高度不断增加, 且由拟合直线的斜率可以计算出, 纳米纤维森林结构的生长速率为 120 nm/min.

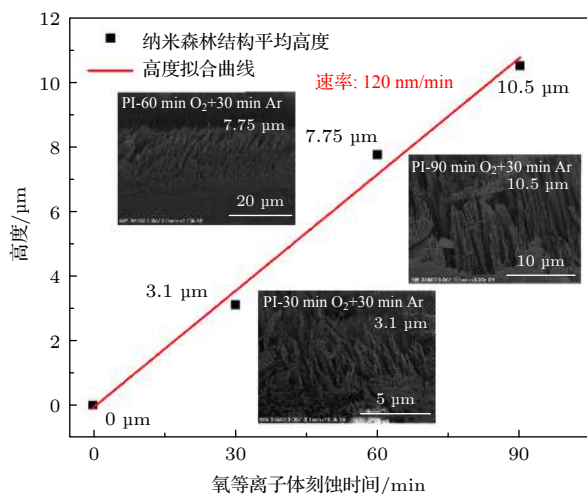


图2 纳米纤维森林结构的平均高度与氧等离子体轰击时间之间的关系曲线

Fig. 2. The plot of the average height of nanofiber forests at different etching time of oxygen plasma.

2.3 复合纳米森林光吸收结构的制备

图3所示为基于PI材料层, 制备具有等离子激元多重杂化效应的复合纳米森林光吸收结构的工艺流程示意图. 实验中, 在得到纳米纤维森林结构之后, 如图3(a)所示, 采用磁控溅射工艺首先在PI材料层的背面溅射一层金纳米薄膜层(图3(b)), 最后在纳米纤维森林结构表面上溅射金纳米颗粒(图3(c)). 工艺过程中, 溅射腔体真空度为 0.5 Pa, 功率为 50 W, 溅射 28 nm 的金纳米颗粒耗时 140 s. 制备得到复合纳米森林光吸收结构后, 通过测量图4插图 SEM 照片方框区域内 100 个金纳米颗粒, 可以得到复合纳米森林结构表面溅射的大多数金纳米颗粒直径在 28 nm 左右, 结果如图4所示, 为复合纳米森林结构表面附着 100 个金纳米颗粒尺寸分布直方图.

3 测试与结果讨论

3.1 光吸收测试

在测量样品之前, 首先获得空白样品的反射和透射谱图, 排除背景杂散光的干扰. 然后, 将样品放在设备的测试反射(透射)的样品架上, 以获得相应的反射(透射)谱图, 最后利用公式 $A=1-R-T$

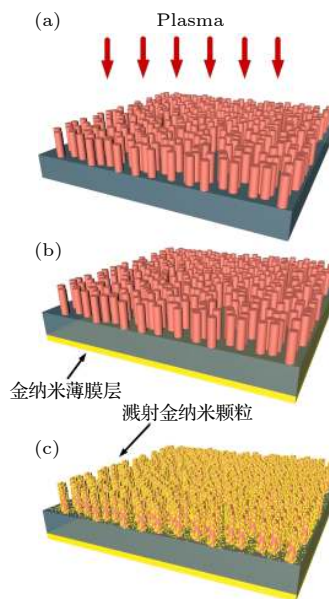


图3 复合纳米森林光吸收结构的制备工艺流程 (a) 纳米纤维森林结构; (b) 材料层背面溅射金纳米薄膜层; (c) 纳米纤维森林结构表面溅射金纳米颗粒

Fig. 3. Preparation process of the composite nanoforests: (a) Nanofiber forests; (b) Au nanofilm sputtering on the back; (c) Au nanoparticle sputtering on surface of the composite nanoforests.

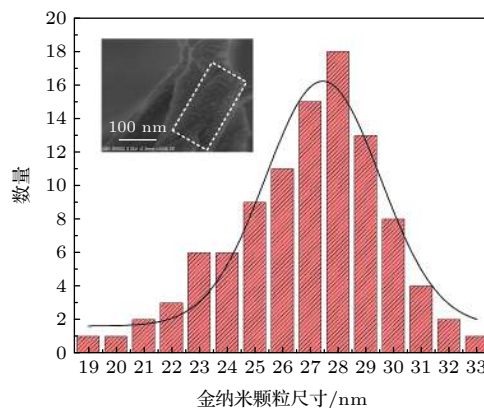


图4 复合纳米森林光吸收结构表面 100 个金纳米颗粒尺寸分布直方图(插图为金纳米颗粒分布 SEM 照片)

Fig. 4. The size distribution histogram of 100 gold nanoparticles on surface of the composite nanoforests (inset shows the gold nanoparticle distribution around a nanofiber).

得到样品的光吸收(A)谱图. 在测试过程中, 光源的波长设置为 380—2500 nm, 且每个测试数据均以 2 s 的积分时间获得. 测试的样品包括由 PI 形成的纳米纤维森林结构、由 PI 形成的复合纳米森林光吸收结构、由其他聚合物(如有机玻璃 (PMMA) 和聚碳酸酯 (PC)) 形成的复合纳米森林光吸收结构.

3.2 PI 纳米森林结构的吸收特性

由于 PI 表面制备的纳米森林结构具有大密度、高深度比等特点, 因此入射到表面的光在纳米森林结构内会发生多级反射、折射 (透射) 和散射, 进而光的传播路径被延长, 同时光吸收次数增加, 即表现出由陷光效应引起的光吸收率的提高 [28–33], 且随着纳米纤维森林结构高度的增加, 陷光作用加强, 因而光吸收率会有所提高. 图 5 所示为不同高度纳米纤维森林结构的吸收谱. 从图中可以看出, PI 纳米纤维森林结构在可见光 (380–780 nm) 波段随着光波长的增大光吸收率降低, 近红外光 (780–1500 nm) 吸收低于 10%, 中红外波段 (1.5–

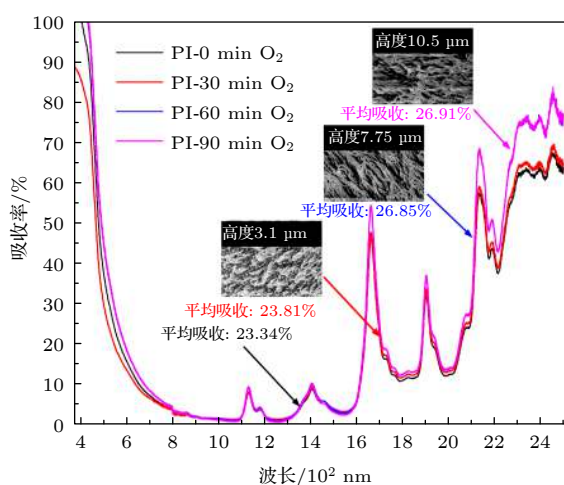


图 5 具有不同高度纳米纤维森林结构的 PI 材料层的吸收谱图 (插图为不同时间氧等离子体轰击后 PI 表面的 SEM 照片)

Fig. 5. Absorption spectra and the SEM images (inset) of PI nanofiber forests with different heights.

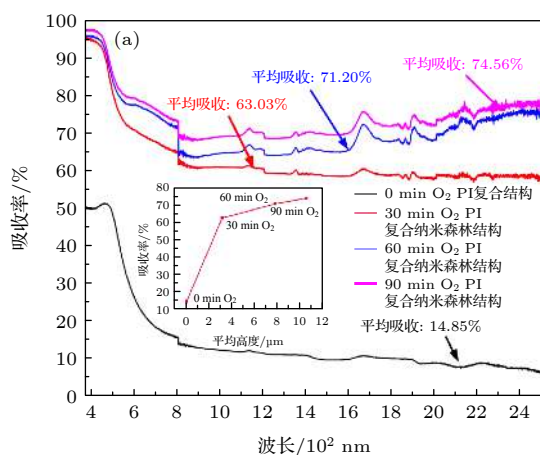


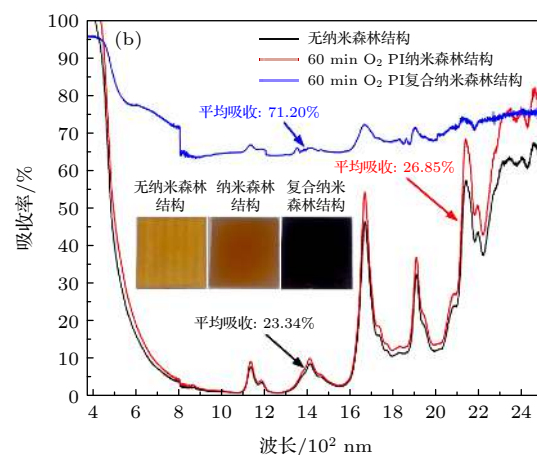
图 6 PI 光吸收结构的吸收谱图 (a) 不同时间氧等离子体轰击后的 PI 复合纳米森林结构的光吸收率; (b) 不同 PI 光吸收结构的光吸收率

Fig. 6. Absorption spectra of PI: (a) Composite nanoforests after different periods of bombardment; (b) different structures.

2.5 μm) 由于光与聚酰亚胺分子中化学键的共振吸收 [34], 在特定波长处出现高吸收峰. 此外, 从光的平均吸收率可以看出, 随着 PI 纳米纤维森林结构高度的增加, 陷光效应增强, 与原始 PI 材料层相比, 具有 10 μm 高度纳米纤维森林结构的 PI 材料层的平均光吸收率提高了约 3.5%. 但是, 由于纳米纤维结构自身对这一波长范围内的光的吸收率较低, 即便存在陷光效应, 也很难大幅提升光吸收率.

3.3 PI 复合纳米森林光吸收结构的吸收特性

图 6(a) 所示为经不同时间氧等离子体轰击所得的 PI 复合纳米森林光吸收结构在 380–2500 nm 范围的光吸收谱图. 图 6(a) 插图为不同 PI 复合结构的光吸收率与平均高度之间的关系曲线. 从图中可以看出, 未经氧等离子体轰击的 PI, 材料层表面因没有形成纳米森林结构, 金纳米颗粒层覆盖在表面形成了金属薄膜, 致使整体反射率增大, 平均光吸收率只有 14.85%. 而随着氧等离子体轰击时间增加到 30 min, 表面形成了纳米纤维森林结构后, PI 复合纳米森林结构的平均光吸收率提高到 60% 以上; 之后, 随着纳米纤维森林结构高度的增加, 平均光吸收率逐渐提高, 可达 74.56%. 当表面形成纳米森林结构后, 即复合纳米森林光吸收结构, 才能实现光的高吸收, 且光吸收率随着纳米森林结构高度的增加而提高. 从图 6(b) 可见, 复合纳米森林结构可以提高 PI 材料层在 380–2500 nm 波段约 50% 的平均光吸收率, 最终实现在宽谱范围内的高吸收. 图 6(b) 还对应给出了三种结构的



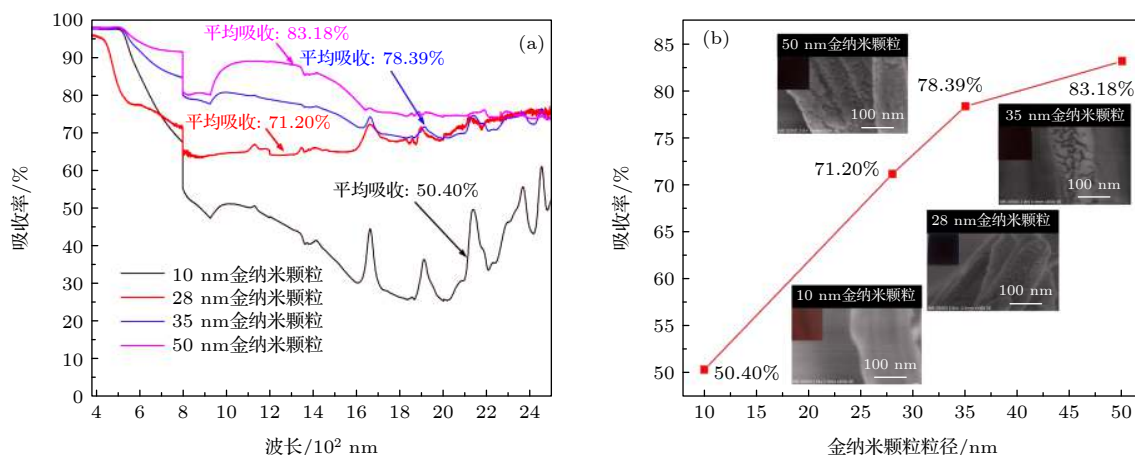


图7 表面分布着不同粒径尺寸金纳米颗粒的PI复合纳米森林结构光吸收率 (a) 吸收谱图; (b) 光吸收率与金纳米颗粒粒径之间的关系曲线 (插图为SEM图及样品照片)

Fig. 7. Absorption rate of PI composite nanoforests with gold nanoparticles of different sizes: (a) Absorption spectra; (b) the change curve of light absorption rate of nanoforests with gold nanoparticles of different sizes (insets show images of the sample).

制备样品照片,可以看出,具有纳米森林结构的样品表面失去了材料本身的光泽而变暗,具有复合纳米森林结构的样品表面呈现黑色,由对应吸收谱图可知,照射到其表面的大部分光被其吸收。

图7(a)所示为经60 min氧等离子体轰击后,表面分布着不同粒径尺寸金纳米颗粒的PI复合纳米森林光吸收结构在380—2500 nm范围的光吸收谱图。图7(b)为表面分别溅射有10, 28, 35以及50 nm金纳米颗粒的PI复合纳米森林结构的光吸收率与金纳米颗粒粒径之间的关系曲线,插图分别为其表面SEM图及制备样品照片。由图可知,溅射有10 nm金纳米颗粒的复合纳米森林结构由于金纳米颗粒粒径太小,未形成较连续的纳米颗粒层,且基底材料为不具有导电性的聚合物,因此在表面SEM照片上不能清楚地看到金纳米颗粒分布,其对应制备的复合纳米森林结构平均光吸收率最低,为50.40%,样品表面颜色偏棕色;之后随着溅射的金纳米颗粒粒径增大,形成的复合纳米森林结构平均光吸收率提高,由图7可得,表面分布有50 nm金纳米颗粒的PI复合纳米森林结构的光吸收率最高,达83.18%。这是由于当光作用于金纳米颗粒上时,其表面会产生等离激元共振,引起附近电磁场增强,而随着金纳米颗粒尺寸增大,电磁场增强越大,从而使金纳米颗粒表现出对光更强的吸收特性^[35]。综上可以得出,通过控制纳米森林结构表面分布的金纳米颗粒的粒径,可以提高复合纳米森林结构的光吸收率,由制备样品照片可以看出,金纳米颗粒尺寸越大,样品表面颜色越黑,即照射

到其表面的大部分光被其吸收。

3.4 不同聚合物复合纳米森林光吸收结构的吸收特性

为了利用复合纳米森林结构提高不同的聚合物材料的光吸收能力,采用等离子体再聚合技术尝试在更多的聚合物材料(如有机玻璃(PMMA)和聚碳酸酯(PC))表面制备纳米森林结构。图8(a)为三种相同厚度(2 mm)聚合物表面无纳米森林结构时在可见光到近红外光的光吸收谱图,从图中可以看出,三种聚合物材料本身的平均光吸收率约为20%。图8(b)所示为经过60 min氧和30 min氩等离子体轰击后的不同聚合物表面,再采用磁控溅射工艺制备得到的复合纳米森林光吸收结构的吸收谱图,图中同时给出了对应制备得到的不同聚合物复合纳米森林结构。从图中可见,不同聚合物的复合纳米森林光吸收结构形态不同,对应光吸收率也各不相同,这是由于构成不同聚合物的分子结构和化学键不同,当等离子体直接轰击材料时,表面发生了不同的物理和化学反应,最终形成不同形态的纳米森林结构,其中材料本身的光吸收特性以及纳米森林结构形态决定光的吸收率大小。图9所示为这三种聚合物在表面制备复合纳米森林结构前后光吸收率的对比图,图中对应给出了制备样品照片,其中具有复合纳米森林结构的样品光吸收率高,表面颜色为黑色或棕黑色;此外,由于PI的折射率为1.68,比另外两种材料的折射率大(PMMA折射率为1.59, PC折射率为1.52),因此,PI材料

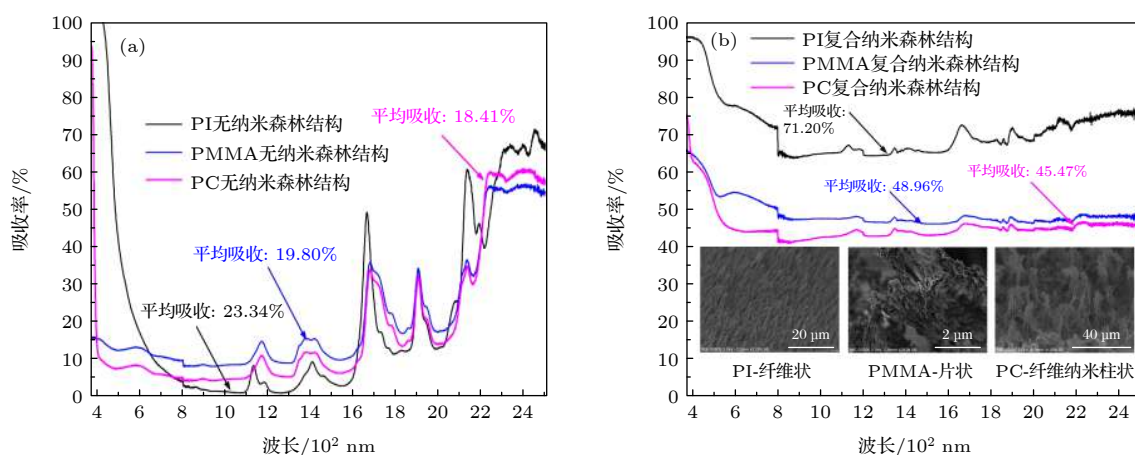


图 8 相同工艺条件下不同聚合物光吸收结构的吸收谱图 (a) 制备纳米纤维森林结构前不同聚合物的吸收谱; (b) 制备了复合纳米森林结构后的不同聚合物的吸收谱 (插图为 SEM 照片)

Fig. 8. Absorption spectra of different polymers: (a) Without nanoforests; (b) with composite nanoforests (inset show the corresponding SEM images).

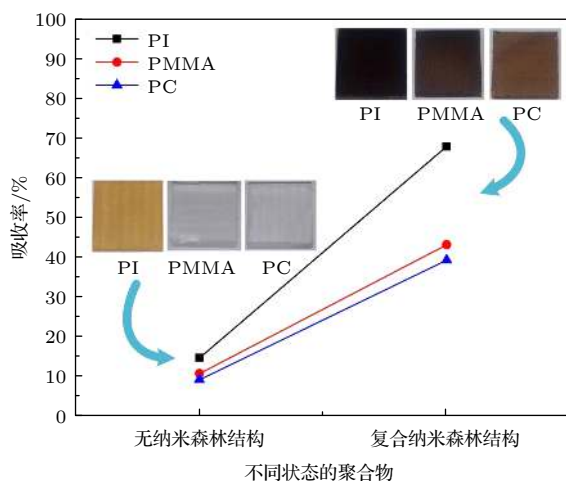


图 9 三种聚合物在表面制备复合纳米森林结构前后光吸收率的对比

Fig. 9. Light absorption curves of three polymers before and after preparation of composite nanoforests.

的光吸收率比另外两种材料的高^[36]. 综上得出, 等离子体再聚合技术在不同聚合物的纳米森林结构制备中具有通用性, 且通过该技术制备得到的不同聚合物复合纳米森林结构均可以提高在 380—2500 nm 波段的光吸收, 实现宽谱高吸收.

3.5 PI 复合纳米森林光吸收结构的仿真分析

由于贵金属纳米结构可以与入射电磁场发生强烈的相互作用, 当金属表面的电荷与电磁场耦合发生集体振荡时, 产生表面等离激元, 从而使金属纳米结构材料具有对光的高度吸收和局域电磁场增强^[37]. 本文利用时域有限差分 (FDTD) 软件以

PI 作为基底、纳米森林结构以及复合纳米森林结构分别为目标模型, 入射的正弦电磁波沿 Z 方向传播, 偏振方向与 X 方向平行, 进行电磁场分布仿真. 其中, 纳米森林结构由纤维状纳米结构聚集形成, 复合纳米森林结构表面包覆有金纳米颗粒. 图 10 所示为不同光吸收结构及其电磁场分布的仿真结果. 由图 10(a) 和图 10 (b) 可以看出, 基底表面纳米森林结构的存在使得基底上的表面电磁场增强, 增强的电磁场主要产生于纳米森林结构表面, 其原因可归结于陷光效应^[38]. 由图 10(b) 和图 10 (c) 可以看出, 复合纳米森林结构由于表面引入金纳米颗粒, 在纳米森林结构及其间隙表面的金纳米颗粒附近电磁场增强, 尤其在纳米森林结构顶部增强的电磁场分布区域更广, 其原因可归结于等离激元多重杂化效应. 首先, 当入射光照射到复合纳米森林结构上时, 光与结构表面的金纳米颗粒发生相互作用, 金纳米颗粒表面自由电子在电磁场的驱动下发生集体振荡, 产生局域表面等离激元^[39,40], 因此在颗粒表面数十纳米区域产生电磁场增强. 其次, 从图 10(c) 插图可知, 纳米森林结构由多根纳米纤维结构聚集形成, 且表面随机分布着不同粒径的金纳米颗粒. 这些位于不同纳米纤维结构上的不同粒径的金纳米颗粒, 在电磁场的作用下产生不同强度的局域表面等离激元, 从而相互之间发生不同程度的电磁场耦合. 如图 10(c) 右图所示, 复合纳米森林结构顶端的电场增强区域更大, 由此可见, 等离激元多重杂化效应的引入可以使纳米森林光吸收结构在宽光谱范围内提高吸收率^[41–43].

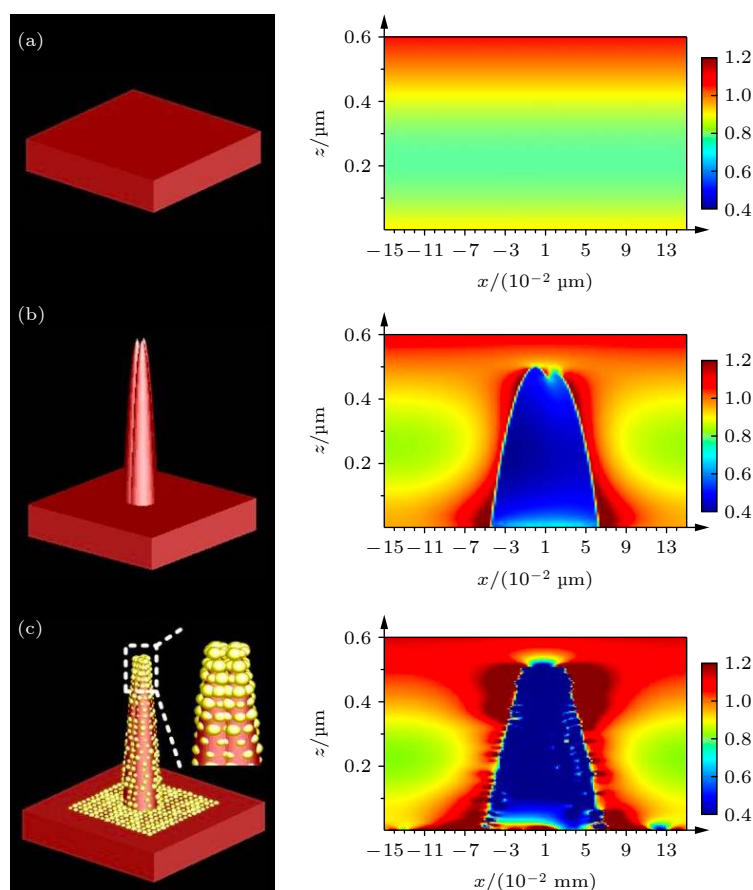


图 10 不同结构的电磁场增强 FDTD 仿真分析 (a) 基底表面电磁场分布; (b) 纳米纤维森林结构周围的电磁场分布; (c) 复合纳米森林结构周围的电磁场分布

Fig. 10. FDTD simulation analysis of different structures: (a) Distribution of electric field on the substrate surface; (b) distribution of electric field around a nanofiber; (c) distribution of electric field around a composite nanofiber.

4 结 论

本文通过等离子体再聚合技术制备具有等离激元多重杂化效应的复合纳米森林光吸收结构,使聚合物在 380—2500 nm 波长范围内的平均光吸收率从 23.34% 提升至 74.56%,实现了宽谱高吸收. 这种制备工艺简单快捷,对不同的聚合物材料具有通用性,且通过改变工艺条件,可以实现对结构和吸收率的调控. 可以预见,这种聚合物光吸收结构及其制备方法将在光学器件中得到广泛应用并具有重要意义.

参考文献

- [1] Fu Y, Mei T, Wang G, Guo A K, Wang X B 2017 *Appl. Therm. Eng.* **114** 961
- [2] Liu K K, Jiang Q, Tadepalli S, Raliya R, Naik R R 2017 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **9** 7675
- [3] Kashyap V, Al-Bayati A, Sajadi S M, Irajizad P, Wang S H 2017 *J. Mater. Chem. A* **5** 15227
- [4] Liu T, Li Y 2016 *Nat. Photonics* **10** 361
- [5] Chen H, Blaber M G, Standridge S D, Demarco E J, Hupp J T, Ratner M A 2012 *J. Phys. Chem. C* **116** 10215
- [6] Yu X, Fu Y, Cai X, Kafafy H, Zou D 2013 *Nano Energy* **2** 1242
- [7] Lv Y, Cai B, Wu Y, Wang S, Jiang Q, Ma Q 2018 *J. Energy Chem.* **27** 951
- [8] Henrik L 2007 *Energy* **32** 912
- [9] Kuo M, Lo W 2014 *IEEE Trans. Ind. Appl.* **50** 2818
- [10] Yu Y, Huang L, Cao L 2014 *Sci. Rep.* **4** 4107
- [11] Xue G, Liu K, Chen Q, Yang P, Li J, Ding T 2017 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **9** 15052
- [12] Luo X, Huang C, Liu S, Zhong J 2018 *Int. J. Energy Res.* **42** 4830
- [13] Olson T Y, Zhang J Z 2008 *J. Mater. Sci. Technol.* **24** 433
- [14] Gesquiere A J 2010 *J. Am. Chem. Soc.* **132** 3637
- [15] Rinke P, Scheffler M, Qteish A, Winkelkemper M, Bimberg D, Neugebauer J 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 161919
- [16] Mao H, Ou W 2015 *US Patent* **9** 117 949
- [17] Zhu L, Gao M, Peh C K N, Wang X, Ho G W 2018 *Adv. Energy Mater.* **6** 14571
- [18] Tran V T, Kim J, Tufa L T, Oh S, Kwon J, Lee J 2017 *Anal. Chem.* **90** 225
- [19] Li C, Jiang D, Huo B, Ding M, Huang C, Jia D 2019 *Nano Energy* **60** 841
- [20] Chen Y, Elshobaki M, Ye Z, Park J M, Noack M A, Ho K M

- 2013 *Phys. Chem. Chem. Phys.* **15** 4297
- [21] Liu Y R, Shang X, Gao W K, Dong B, Li X, Li X H 2017 *J. Mater. Chem. A* **5** 2885
- [22] Ostfeld A E, Pacifici D 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 113112.1
- [23] Cao Y, Du P, Qiao Y 2014 *Appl. Phys. Lett.* **105** 153902.1
- [24] Lv Y, Cai B, Wu Y, Wang S, Jiang Q, Ma Q 2018 *Journal of Energy Chemistry* **27** 951
- [25] Yu Y, Huang L, Cao L 2014 *Scientific Reports* **4** 4107
- [26] Lin Q, Lu L, Tavakoli M M, Zhang C, Lui G C, Chen Z 2016 *Nano Energy* **22** 539
- [27] Wang Y, Tang L, Mao H, Lei C, Ou W, Xiong J, Wang W, Wang L, Hu J 2016 *IEEE 29th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)* Shanghai, China, January 24–28, 2016 p1185
- [28] Auer S, Frenkel D 2001 *Nature* **413** 711
- [29] Han K M, Cho J S, Yoo J 2015 *Vacuum* **115** 85
- [30] Linbao L, Di W, Chao X, Jigang H, Xingyuan Z, Fengxia L 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1900849
- [31] Meng L, Zhang Y, Yam C Y 2017 *J. Phys. Chem. Lett.* **8** 571
- [32] Shalchian M, Grisolia J, Assayag G B, Coffin H, Atarodi S M, Claverie A 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 163111
- [33] Park Y, Berger J, Tang Z, Mueller-Meskamp L, Lasagni A F, Vandewal K 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 093301
- [34] Yu A, Bunai N I, Dolgikh A A, Kharchenko V F, Valeev V I, Nuzhdin R I 2014 *J. Appl. Spectrosc.* **81** 188
- [35] Gesquiere A J 2010 *J. Am. Chem. Soc.* **132** 400
- [36] Thongrattanasiri S, Koppens F H L, Abajo F J G D 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 047401
- [37] Duan H G, Fernández-Domínguez A I, Bosman M 2012 *Nano Lett.* **12** 1683
- [38] Hu Y, LaPierre R R, Li M 2012 *J. Appl. Phys.* **112** 104311
- [39] Kim S K, Ee H S, Choi W, Kwon S H, Kang J H, Kim Y H 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 011109
- [40] Hillenbrand R, Taubner T, Keilmann F 2002 *Nature* **418** 159
- [41] Zhou L, Tan Y, Ji D, Zhu B, Zhang P, Xu J 2016 *Sci. Adv.* **2** e1501227
- [42] Zhou L, Tan Y, Wang J 2016 *Nat. Photonics* **10** 393
- [43] Liang J, Liu H, Yu J, Zhou L, Zhu J 2019 *Nanophotonics* **8** 771

Light absorbing structures based on plasmon multi-hybrid effect*

Yang Shuai¹⁾²⁾ Mao Hai-Yang^{2)3)†} Bao Ai-Da^{1)‡} Guo Xin¹⁾
 Li Rui-Rui¹⁾²⁾ Yang Yu-Dong²⁾ Shi Meng²⁾ Chen Da-Peng²⁾

1) (*College of Instrumentation and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China*)

2) (*Integrated Circuit Advanced Process Center, Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

3) (*Jiangsu Hinoaic Technologies Co., Ltd., Wuxi 214001, China*)

(Received 10 September 2020; revised manuscript received 19 October 2020)

Abstract

In recent years, the polymers represented by macromolecular materials have attracted widespread attention due to their higher flexibility and viscoelastic, compared with other materials used for light absorption (such as semiconductor materials, carbon-based materials and noble metal nanomaterials). Although the polymers have shown potential applications in the photothermal field, compared with other light-absorbing materials, the polymer substrates have a low light absorption rate and a narrow absorption bandwidth concentrated in the visible light band. Therefore, it is necessary to prepare a structure on the polymer material layer for absorbing light, thereby improving the ability of the polymer to absorb light. In addition, since the existing preparation processes of polymer absorption structures require the use of templates and the processes are relatively complicated, there is an urgent need for a simple and easy process to prepare the absorption structures on the polymer material layer. In this article, composite nanoforests are prepared on polymer substrates based on a plasma repolymerization technology and magnetron sputtering process; due to the metallic nanoparticles existing, multi-hybrid plasmonic effect is achieved, thus the average light absorption rate of the polymer in a wavelength range of 380–2500 nm is increased from 23.34% to 74.56%. Such polymer composite nanoforests have high absorption characteristics in a wide spectral range. The method of preparing the structure is quite simple, and can be applied to preparing different polymer materials. Besides, by changing the plasma bombardment time, the morphology of the nanoforests can be adjusted; by increasing the size of the metallic nanoparticles, the absorption of the composite nanoforests can be increased. It is foreseeable that the polymer composite nanoforests will have applications in various optical devices.

Keywords: plasma repolymerization, composite nanoforests, light absorbing structures, plasmon multi-hybrid

PACS: 78.68.+m, 78.66.Sq, 78.40.-q, 73.20.Mf

DOI: 10.7498/aps.70.20201512

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61771467), the High Technology Research and Development Project of Guangdong Province, China (Grant No. 2019B010117001), and the Youth Innovation Promotion Association, Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. 2018153).

† Corresponding author. E-mail: maohaiyang@ime.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: baoida@nuc.edu.cn