

基于石墨烯的Au纳米颗粒增强染料随机激光

沈艳丽 史冰融 吕浩 张帅一 王霞

Dye random laser enhanced by graphene-based Au nanoparticles

Shen Yan-Li Shi Bing-Rong Lü Hao Zhang Shuai-Yi Wang Xia

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 034206 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211613

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211613>

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

石墨烯与复合纳米结构SiO₂@Au对染料敏化太阳能电池性能的协同优化

Significant enhancement of the performance of dye-sensitized solar cells with photoelectrode co-doped graphene and hybrid SiO₂@Au nanostructure

物理学报. 2020, 69(16): 160201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191722>

基于石墨烯纳米条波导边耦合矩形腔的等离子体诱导透明效应

Plasmon induced transparency effect based on graphene nanoribbon waveguide side-coupled with rectangle cavities system

物理学报. 2022, 71(2): 024201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211397>

基于表面等离子体共振的新型超宽带微结构光纤传感器研究

A new type of ultra-broadband microstructured fiber sensor based on surface plasmon resonance

物理学报. 2021, 70(7): 074207 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201477>

等离子体对石墨烯的功能化改性

Graphene modification based on plasma technologies

物理学报. 2021, 70(9): 095208 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202078>

开放式多通道多芯少模光纤表面等离子体共振生物传感器

Multi-channel few-mode multicore fiber based surface plasmon resonance biosensor with open air-hole

物理学报. 2020, 69(13): 137802 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200353>

等离子体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>

基于石墨烯的 Au 纳米颗粒增强染料随机激光*

沈艳丽¹⁾²⁾³⁾ 史冰融¹⁾²⁾ 吕浩^{1)2)†} 张帅一¹⁾²⁾ 王霞^{1)2)‡}

1) (山东省新型光电材料与技术工程实验室, 青岛 266061)

2) (青岛科技大学数理学院, 青岛 266061)

3) (青岛科技大学材料科学与工程学院, 青岛 266042)

(2021 年 8 月 31 日收到; 2021 年 9 月 22 日收到修改稿)

石墨烯和纳米颗粒的复合材料具有新颖的光学和电学特性, 被广泛应用于信息传感、光电转换、医学诊断等领域, 具有十分广阔的发展前景. 虽然石墨烯拥有优异的光电性能, 可以实现对随机激光性质的调控, 但目前实现特殊结构的石墨烯与金属纳米结构的复合过程复杂繁琐, 利用石墨烯有效降低随机激光阈值仍存在挑战. 本文利用便捷的化学还原及吸附法制备 Au/石墨烯结构, 以染料 DCJTb 为增益介质, 使用旋涂法制备了均匀的薄膜样品; 研究对比 Au 纳米颗粒和 Au/石墨烯结构随机激光特性, 分析了石墨烯的作用机理. 研究表明, Au/石墨烯复合材料透射峰与增益介质的光致发光光谱峰最为接近, 对于染料分子的能级跃迁起到了促进作用. 在相同的增益介质中, 石墨烯的加入不仅使得光子在无序介质中散射频次增加, 促进了增益效果, 而且增强了 Au 纳米颗粒表面的等离子体共振效应. 二者相互协同, 展现出了优异的随机激光特性, 阈值降低至 $2.8 \mu\text{J}/\text{mm}^2$; 对样品重复测量可得样品的激光重复性较强、品质较高. 本研究对促进随机激光应用、实现高性能的光电器件起到了一定的推动作用.

关键词: 随机激光, 表面等离子体共振, 石墨烯, 金纳米颗粒**PACS:** 42.55.Zz, 71.45.Gm, 78.67.Wj, 78.67.Bf**DOI:** 10.7498/aps.71.20211613

1 引言

随机激光是光在具有增益介质的无序介质中受到多重散射反馈放大形成的一种受激辐射现象^[1,2]. 辐射的模式与无序样品中基底介质的光学性质、散射体光学性质以及空间分布情况息息相关. 与传统激光相比, 随机激光独特的发光机理、无腔和小体积的性质引起了人们的极大关注, 在生物传感、微光显示、医学检测等诸多方面都有十分广泛的应用潜力^[3–6]. 随着对随机激光研究的不断深入, 人们在寻找新材料^[7–10]、降低阈值^[11–13]以及出射激光的调控^[14–16]这三大领域中取得了一系

列进展, 对随机激光的发光原理和性质控制有了较深入的认识.

在随机激光的研究中, 基于金属纳米颗粒的表面等离子体增强激光发光是一种常用的方式. 表面等离子体共振实质上是光子与金属的自由电子相互作用时二者产生共振形成的一种集体振荡的状态, 这时可以产生很强的局域电场^[17,18]. 基于表面等离子体共振的贵金属激起了人们对随机激光影响的探究. Long 等^[19]对分别掺杂 Ag 和 SiO_2 纳米颗粒的样品激光性能进行了比较, 证实了 Ag 纳米颗粒表面等离子体效应可以有效地增强局域电磁场, 促进随机激光发射. Zhai 等^[20]发现 Au 纳米岛的等离子体共振与染料的荧光光谱具有良好的重

* 山东省自然科学基金 (批准号: ZR2020QF083) 和国家自然科学基金 (批准号: 12174211, 12174212) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lvhao@qust.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: phwangxia@163.com

叠性是实现窄带宽、低阈值随机激光的关键,且激光的波长受纳米颗粒尺寸的影响. Zhang 等^[21]通过研究 Au@Ag 纳米棒复合材料,发现复合材料可以产生强表面等离子体效应和强散射性能,有利于进一步降低随机激光的阈值.

除了可以使用贵金属纳米颗粒的复合结构作为散射介质,新型的碳材料也成为优化随机激光性能的候选. 在随机激光的研究中,引入单层或少层石墨烯,可实现随机激光性质的调控. Marini 和 Garcia^[22]研究发现,具有极低可饱和度和吸收阈值的石墨烯纳米片与罗丹明 6G 混合,可发挥比单独纳米颗粒更好的散射效果. Pradip 等^[23]通过制备 Ag 纳米颗粒和垂直石墨烯复合材料,证实了垂直石墨烯的添加能使散射效应增强,随机激光展现出阈值降低现象. Lee 等^[24]发现 Au 纳米颗粒和石墨烯复合材料激光特性可用于结核病的检测. 石墨烯及其衍生物具有独特的能带关系、强的光子捕获和超高电子迁移率,它们与具有等离子体共振的 Au 纳米颗粒复合,会引起等离子体共振、场强以及光学性能改变,进而引发激光阈值及强度发生相应的改变^[25]. 但是特殊结构的石墨烯与金属纳米结构复合的实现过程复杂繁琐,而且有效实现石墨烯与金属纳米颗粒在随机激光中的调控,进一步降低随机激光阈值仍然存在挑战.

本研究采取便捷有效的化学还原及吸附的方法,在多层石墨烯表面制备了 Au 纳米颗粒,以染料 DCJT_B^[26] 为增益介质构建随机激光系统,研究了石墨烯对随机激光阈值的影响及调控. 利用 Au/石墨烯复合结构促进光子增益、增强 Au 纳米颗粒表面等离子体共振,进一步降低了随机激光阈值,对实现低阈值、性质可调的随机激光器的研究具有一定的实用意义.

2 实验

在制备 Au/石墨烯水溶液的实验过程中,以氯金酸溶液为金源,以石墨烯为基底材料. 将 1 mL 氯金酸溶液 (20 mg/mL) 稀释为 50 mL 后加入三口烧瓶,持续加热搅拌至沸腾. 以 1.25 mL 柠檬酸钠溶液 (60 mg/mL, 阿拉丁) 作为还原剂水浴回流. 然后加入 0.2 mL 石墨烯水溶液 (1 mg/mL, 杭州杭丹科技), 利用石墨烯的静电效应和 π 电子对力的相互作用将 Au 原子吸附于石墨烯上,持续沸

腾搅拌 30 min, 确保充分混合. 待溶液冷却至室温后加入 2 mL 的聚乙烯吡咯烷酮表面活性剂 (100 mg/mL, 阿拉丁) 并搅拌 50 min, 避免纳米颗粒的团聚. 随后以 8000 r/min 的速度离心除去混合液中的杂质,将得到的 Au/石墨烯结构重新分散在去离子水中. 制作 Au 纳米颗粒的过程与上述相同,但无需加入石墨烯,其他条件保持一致.

DCJT_B 染料和甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 以 1:10 的质量比溶于二氯甲烷,将金纳米颗粒或 Au/石墨烯结构溶于不同体系的二氯甲烷中,最后以体积比为 1:1 混合制作成具有一定黏度的缓和溶液. 用移液管取 20 μ L 混合液以 3000 r/min 的速度旋涂于洁净的石英表面,获得图 1 所示激光样品以备测量.

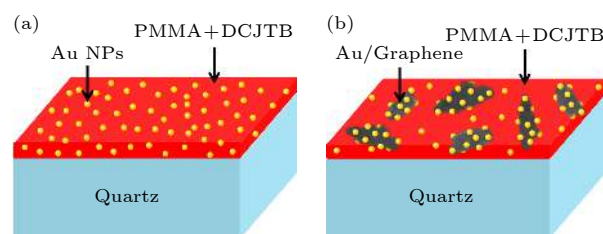


图 1 (a) Au 纳米颗粒激光样品模型图; (b) Au/石墨烯激光样品模型图

Fig. 1. Model of (a) Au NPs and (b) Au/Graphene lasing sample.

3 实验结果与讨论

采用透射电子显微镜 (TEM, JEOL, JEM-2100 Plus) 和扫描电子显微镜 (SEM, HITACHI FE-SEM SU8000) 对石墨烯进行形貌表征,结果如图 2(a) 和图 2(b)^[27]. 可以看出二维石墨烯存在部分褶皱,属于层数小于 10 层的多层石墨烯^[28]. 采用红外光谱 (IR, Magna FTIR-750, Nicolet) 检测石墨烯的化学结构,由图 2(c) 含氧特征峰可以看出,石墨烯有很少一部分出现氧化,这对于实验中石墨烯与 Au 纳米颗粒的复合起到了促进作用^[29]. 图 2(d) 所示的石墨烯拉曼光谱 (inVia Raman microscope, Renishaw) 表明,无序振动峰 D 峰位于 1357 cm^{-1} , 反映石墨烯晶格对称性以及 C 原子有序度的 G 峰位于 1586 cm^{-1} . 石墨烯的表征结果表明实验中所采用的石墨烯结构和性质稳定.

图 3(a) 所示为 Au 纳米颗粒的 TEM 图,可以看出, Au 纳米颗粒分散均匀,几乎没有团聚现象.

Au 纳米颗粒粒径分布直方图如图 3(b) 所示, 平均粒径约为 15 nm. 由图 3(c) Au/石墨烯 TEM 图可

以看出, 石墨烯提供的大的比表面积为粒径均匀的 Au 纳米颗粒提供了附着点, 且粒子间没有大规

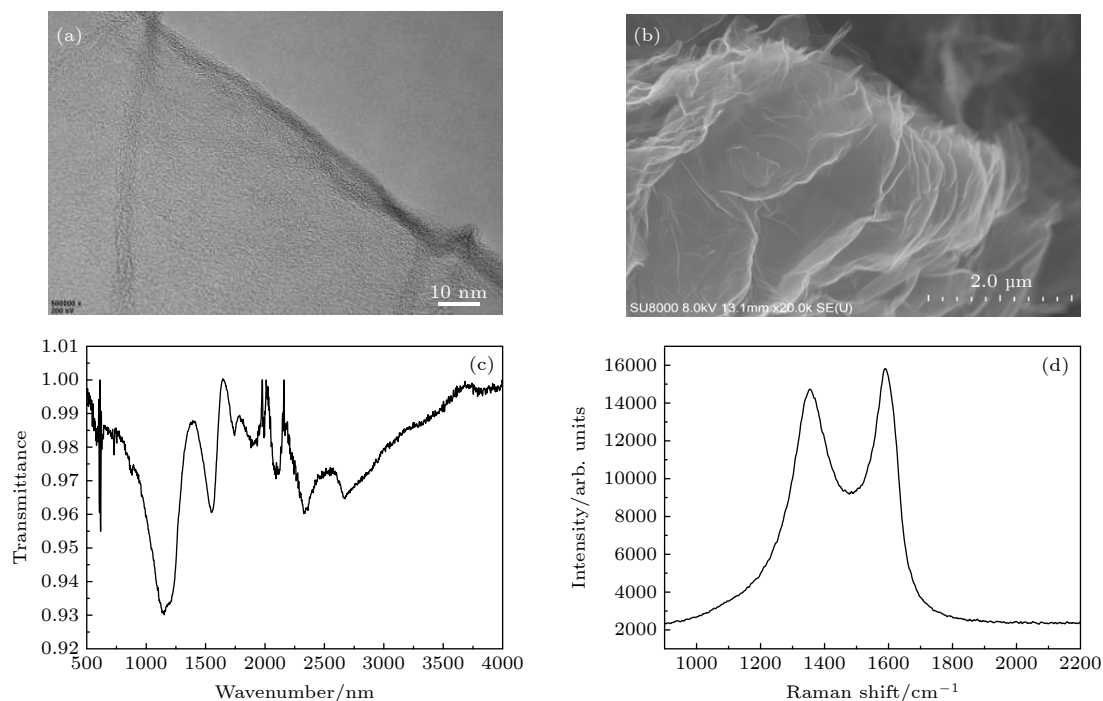


图 2 石墨烯的 (a) TEM 图、(b) SEM 图、(c) 红外光谱图和 (d) 拉曼光谱图

Fig. 2. (a) TEM image, (b) SEM image, (c) IR spectra, and (d) Raman spectra of Graphene.

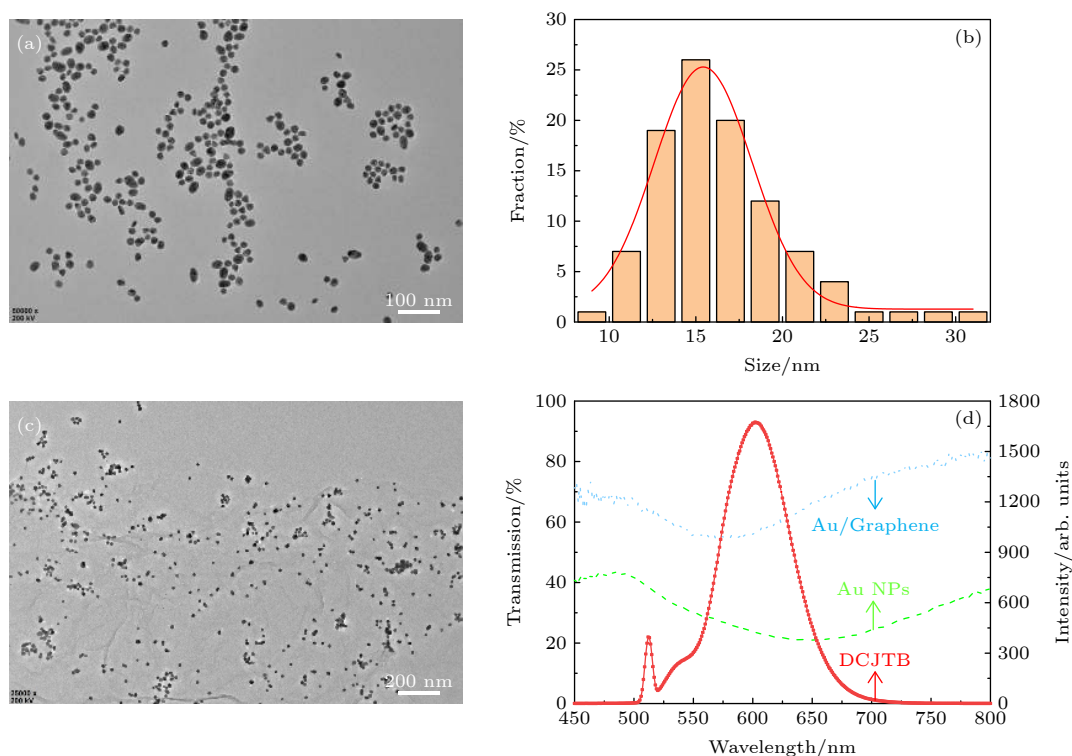


图 3 (a) Au 纳米颗粒的 TEM 图; (b) Au 纳米颗粒的粒径分布统计图; (c) Au/石墨烯的 TEM 图; (d) Au 纳米颗粒和 Au/石墨烯的透射光谱以及 DCJTb 染料光致发光光谱

Fig. 3. (a) TEM images of Au NPs; (b) the corresponding size distribution of Au NPs; (c) TEM images of Au/Graphene; (d) transmission spectra of Au NPs, Au/Graphene and photoluminescence spectra of DCJTb.

模团聚现象, 获得了稳定的 Au/石墨烯复合结构. 由图 3(d) 光谱图可以看出, DCJTb 荧光峰位于 602 nm, Au 纳米颗粒的吸收位于 648 nm, Au/石墨烯结构的吸收位于 576 nm. 相比于 Au 纳米颗粒, Au/石墨烯复合结构透过率更高且透射峰与 DCJTb 的激光峰更接近, 拥有更好的光谱重叠, 这有利于复合材料与染料间发生能量的转移^[30].

在激光测量实验中, 采用纳秒激光器 (Continuum, Surelite) 发出的重复频率 10 Hz 的 532 nm 脉冲光作为泵浦光, 光束通过透镜汇聚后所得光斑直径为 3 mm, 以 45° 入射角单脉冲激发样品. 泵浦能量密度在 1—20 $\mu\text{J}/\text{mm}^2$, 通过光纤收集激光信号并进行研究分析^[26]. 图 4(a) 显示了 Au 纳米颗粒的随机激光光谱, 激光的中心波长位于 650 nm 处. 当泵浦能量较低时, 光谱有小凸起, 整体较为光滑, 为染料的荧光效应. 随着泵浦能量的增加, 在荧光峰中出现明显的较窄凸起. 图 4(b) 给出了在泵浦能量增加到最大后再逐渐降低的一个循环

过程中激光强度的变化情况. 结果表明, 随着泵浦光束能量的增加, 激光峰值随之增加, 到达某一值后, 随着泵浦光束能量减少, 激光峰值逐渐减少. 泵浦能量升序和降序之间激光峰值强度差别不大, 证实了样品具有较好的激发重复性.

为了研究石墨烯对随机激光性能的影响, 对 Au/石墨烯激光样品进行激光测量. 由图 5(a) Au/石墨烯的随机激光光谱可得, 激光的中心波长位于 653 nm 处, 荧光峰随泵浦能量增加的变化趋势与图 4(a) 中光谱相似, 呈现出典型的阈值特征. 由图 5(b) 激光强度随泵浦能量的变化过程可得, Au/石墨烯样品同样具有好的激发重复性.

图 6 为 Au 纳米颗粒和 Au/石墨烯激光样品在不同泵浦能量下光谱的半峰宽和峰强度变化图. 对 Au 纳米颗粒激光样品来说, 当泵浦能量超过 4.3 $\mu\text{J}/\text{mm}^2$ 后, 光谱半峰宽急剧下降, 由 100 nm 降至 13 nm 左右, 且发射强度迅速增加, 样品的激光阈值约为 4.3 $\mu\text{J}/\text{mm}^2$; 对于 Au/石墨烯激光样

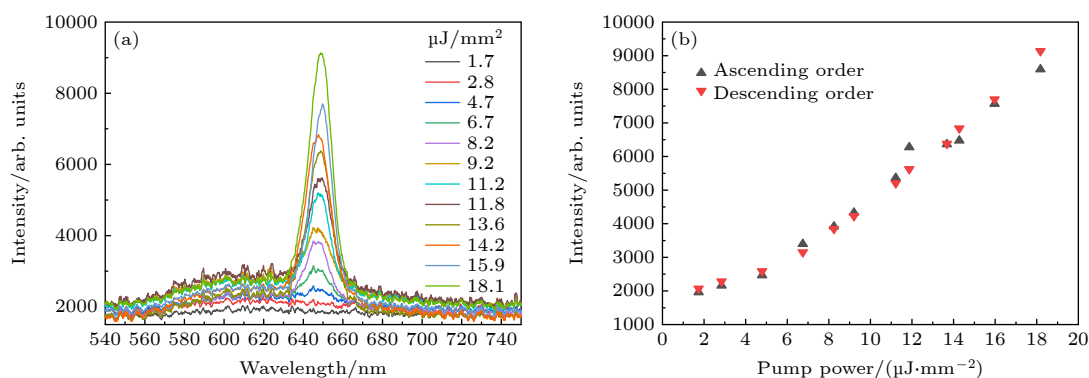


图 4 (a) Au 纳米颗粒激光样品在不同泵浦能量下的光致发光光谱; (b) 激光峰值与泵浦能量的关系图

Fig. 4. (a) Lasing spectra of Au NPs samples at different pump energies; (b) the output intensity of the random lasing as a function of the pump energy.

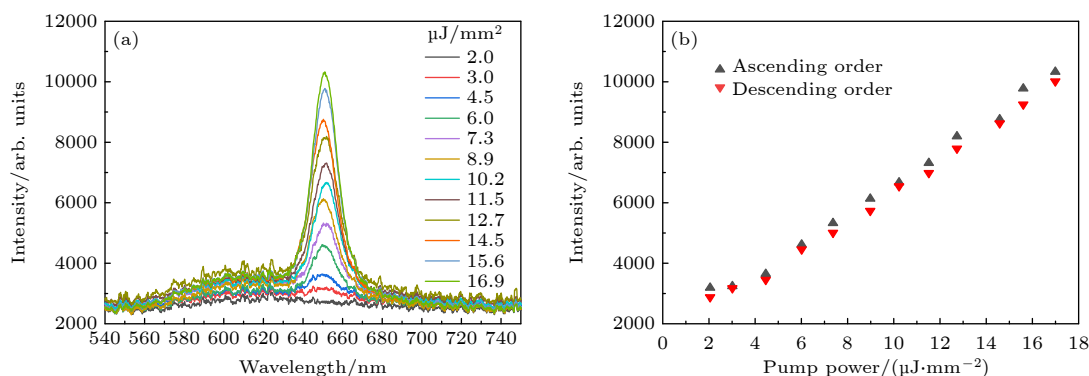


图 5 (a) Au/石墨烯激光样品在不同泵浦能量下的光致发光光谱; (b) 激光峰强度值与泵浦能量的关系图

Fig. 5. (a) Lasing spectra of Au/Graphene samples at different pump energies; (b) the output intensity of the random lasing as a function of the pump energy.

品, 当泵浦能量超过 $2.8 \mu\text{J}/\text{mm}^2$ 后, 光谱半高宽急剧下降至 12 nm 左右, 且发射强度增长速率变大. 相较于 Au 纳米颗粒激射样品, Au/石墨烯复合结构使样品发射强度增加且激射阈值从 $4.3 \mu\text{J}/\text{mm}^2$ 降至 $2.8 \mu\text{J}/\text{mm}^2$, 降幅达 34.8% . 图 6 内插图所示为 Au/石墨烯激射样品在泵浦下的光学图像, 样品在多个方向均有激射光出现.

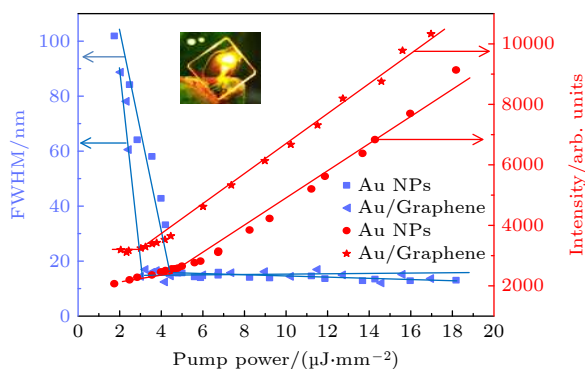


图 6 Au 纳米颗粒和 Au/石墨烯激射样品激射峰值和半高宽与泵浦能量的关系图 (插图为样品在泵浦下的光学图像)
Fig. 6. Intensity and FWHM of lasing peak as a function of the pump energy of Au NPs and Au/Graphene. The inset is the optical image under the pumping.

对比两种激射样品光谱可以看出, Au/石墨烯复合结构会对激光阈值产生影响, 加入石墨烯有利于进一步降低随机激光的阈值, 这是由于等离子体共振效应和介质间散射率变化所导致的 (图 7 中随机激光散射模型示意图). 当散射系统中仅有 Au 纳米颗粒时, 入射光子在具有表面等离子体共振效应的 Au 纳米颗粒间散射, 产生局域增强的电磁场, 激发染料分子发生能级跃迁, 而光子与增益介质间相互作用, 促使光子能量增加 (图 7(a)). 复合结构中石墨烯的作用机制如图 7(b) 原理图所

示, 随着片层石墨烯的加入, 散射截面增大使得大量入射光子束在石墨烯之间发生多重散射, 散射平均自由程减少, 致使光子的散射频次进一步提高, 从而提高了染料与介质间的相互作用, 使光子获得更多的增益能量, 激光阈值降低 [23]. 其次, Au 纳米颗粒因石墨烯加入而分布于石墨烯上下两层使得表面等离子体共振效应增强, 局域增强的电磁场加大, 促进染料分子能级跃迁速率增加 [31,32]. 在复合材料中二者相互协同, 展现出优异的低阈值激光特性.

4 结 论

本文利用化学还原及吸附法成功地制备了 Au/石墨烯复合结构并获得了结构增强的随机激光. 通过对 Au 纳米颗粒和 Au/石墨烯激射测量对比, 研究了基于石墨烯的 Au 纳米颗粒对于染料随机激光阈值的影响, 结果表明石墨烯的加入进一步降低了随机激光的阈值. 相比于 Au 纳米颗粒的样品, 阈值降低了 34.8% . 石墨烯的加入使得样品透射峰向染料荧光光谱峰靠近, 增进了与染料间的相互作用. 石墨烯大的比表面积, 增大了样品的散射截面, 增加了散射频次, 缩短了散射平均自由程, 使得样品在相同的增益介质中, 染料与介质间的相互作用增加, 从而促使光子能量放大. 强的散射效应与 Au 纳米颗粒增强的表面等离子体共振效应相互协同, 促使低阈值随机激光产生. 本研究为新颖碳材料与金属纳米结构增强的随机激光研究提供了便捷有效的方法, 为实现低阈值、高性能的随机激光以及推动光电器件的发展提供了技术途径.

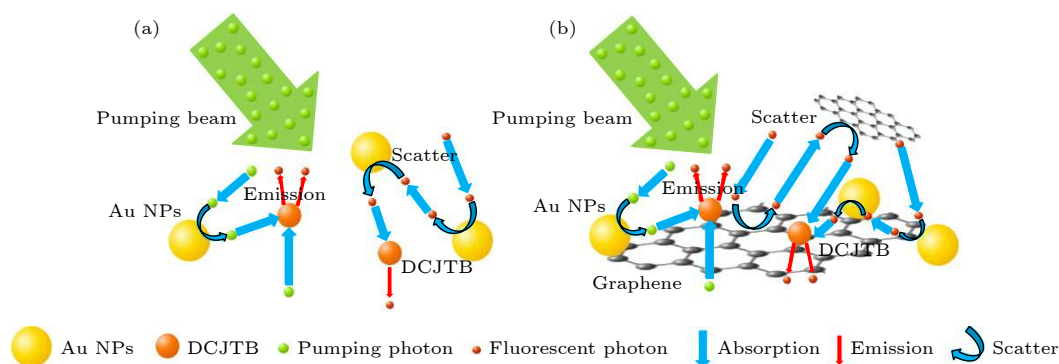


图 7 (a) Au 纳米颗粒散射模型图; (b) Au/石墨烯复合结构散射模型图

Fig. 7. (a) Scattering model diagram of Au NPs; (b) scattering model diagram of Au/Graphene.

参考文献

- [1] Soest G V, Lagendijk A 2002 *Phys. Rev. E* **65** 047601
- [2] Soest G V, Poelwijk F J, Lagendijk A 2002 *Phys. Rev. E* **65** 046603
- [3] Wang Y, Duan Z J, Qiu Z, Zhang P, Wu J W, Zhang D K, Xiang T X 2017 *Sci. Rep.* **7** 8385
- [4] Chen H, Gao S H, Zhang M J, Zhang J Z, Qiao L J, Wang T, Gao F, Hu X X, Li S C, Zhu Y C 2020 *Sensors* **20** 6122
- [5] Wiersma, Diederik S 2008 *Nat. Phys.* **4** 359
- [6] Rashidi M, Haggren T, Su Z, Jagadish C, Tan H H 2021 *Nano. Lett.* **21** 3901
- [7] Siva G V, Nair R V, Krishnan S R, Vijayan C 2017 *Opt. Lett.* **42** 5002
- [8] Haddaw S F, Humud H R, Hamidi S M 2020 *Optik* **207** 164482
- [9] Xia J Y, He J J, Xie K, Zhang X J, Hu L, Li Y, Chen X X, Ma J J, Wen J X, Chen J J, Pan Q S, Zhang J X, Vatik I D, Churkin D, Hu Z J 2019 *Annalen der Physik* **531** 1900066
- [10] Li Y X, Xie K, Zhang X J, Hu Z J, Ma J J, Chen X X, Zhang J X, Liu Z M, Chen D 2020 *Photonic. Sens.* **10** 254
- [11] Chen Z X, Zhang Y J, Chu S, Sun R, Wang J, Chen J P, Wei B, Zhang X, Zhou W H, Shi Y M 2020 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12** 23323
- [12] Yuan F L, Xi Z F, Shi X Y, Li Y C, Li X H, Wang Z N, Fa L Z, Yang S H 2019 *Adv. Opt. Mater.* **7** 1801202
- [13] Gayathri R, Monika K, Murukeshan V M, Vijayan C 2021 *Opt. Laser. Technol.* **139** 106959
- [14] Shi X Y, Bian Y X, Tong J H, Liu D H, Zhou J, Wang Z N 2020 *Opt. Express* **28** 13576
- [15] Wan Y, Deng L G 2019 *Opt. Express* **27** 27103
- [16] Shi X Y, Chang Q, Bian Y X, Cui H B, Wang Z N 2019 *ACS Photonics* **6** 2245
- [17] Wan Y, An Y, Deng L G 2017 *Sci. Rep.* **7** 16185
- [18] Zhang R, Knitter S, Liew S F, Omenetto F G, Reinhard B M, Cao H, Negro D L 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 011103
- [19] Long L, He D, Bao W, Feng M, Chen S 2017 *J. Alloys. Compd.* **693** 876
- [20] Zhai T, Zhang X, Pang Z, Su X, Liu H, Feng S, Wang L 2011 *Nano. Lett.* **11** 4295
- [21] Zhang N M, Ning S Y, Dai K, Zhang Y F, Wu Y, Yuan F, Zhang F H 2020 *Opt. Mater. Express* **10** 1204
- [22] Marini A, Garcia D A F J 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 217401
- [23] Pradip K R, Golam H, Lin H, Liao Y M, Lu C H, Chen K H, Chen L H, Shi W H, Liang C T, Chen Y F 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1800382
- [24] Lee J, Kim J, Ahmed S R, Zhou H 2014 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **6** 21380
- [25] Shi J Y, Chan C Y, Pang Y T, Ye W W, Tian F, Jing L Y, Zhang Y, Yang M 2015 *Biosens. Bioelectron.* **67** 595
- [26] Lü H, Lan Y Y, Zhao Q L, Wang X, Zhang S Y, Teng L H, Tam W Y 2018 *Appl. Phys. B* **124** 227
- [27] Ma H R, Lü H, Wang X 2020 *Optik* **223** 165567
- [28] Bae S, Kim H, Lee Y, Xu X, Park J S, Zheng Y, Balakrishnan J, Lei T, Kim R T, Song Y 2010 *Nat. Nanotechnol.* **5** 574
- [29] Shen T, Li Z, Jiang Y, Luo Z G 2019 *Funct. Mater. Lett.* **12** 1950028
- [30] Ning S, Dong H, Zhang N, Zhao J, Ding L 2016 *Opt. Mater. Express* **6** 3725
- [31] Tao A, Sinsermsuksakul P, Yang P D 2007 *Nat. Nanotechnol.* **2** 435
- [32] Zhang Z Y, Liu L H, Wang W, Cao Z J, Martinelli A, Wang E G, Cao Y, Chen J N, Yurgens A, Sun J 2016 *Adv. Opt. Mater.* **4** 2021

Dye random laser enhanced by graphene-based Au nanoparticles^{*}

Shen Yan-Li¹⁾²⁾³⁾ Shi Bing-Rong¹⁾²⁾ Lü Hao^{1)2)†}

Zhang Shuai-Yi¹⁾²⁾ Wang Xia^{1)2)‡}

1) (*Shandong Advanced Optoelectronic Materials and Technologies Engineering Laboratory, Qingdao 266061, China*)

2) (*School of Mathematics and Physics, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China*)

3) (*College of Materials Science and Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China*)

(Received 31 August 2021; revised manuscript received 22 September 2021)

Abstract

The graphene and nanoparticles composites have novel optical and electrical properties. They are widely used in the fields of information sensing, photoelectric conversion and medical diagnosis. Graphene has excellent photoelectric properties and can regulate the random laser properties, but the current composite process of graphene with special structures and metal nanostructures is complicated. Thus, there is still a challenge to effectively reducing the threshold of random laser by using graphene. In this work, the Au/graphene structure is prepared by convenient chemical reduction and adsorption method, and the dye DCJTb is used as the gain medium to form the film by spin coating. The random laser properties of Au nanoparticles and Au/graphene structure are studied, and the mechanism of graphene is analyzed. The results show that the transmission peak of Au/graphene composite is near the photoluminescence peak of gain medium, which promotes the energy level transition of dye molecules. With the addition of graphene into the same gain medium, the scattering frequency of photons in the disordered medium increases, resulting in the enhancement of surface plasmon resonance. The scattering effect and the surface plasmon resonance effect cooperate with each other, showing good random laser threshold, which is reduced from 3.4 $\mu\text{J}/\text{mm}^2$ to 2.8 $\mu\text{J}/\text{mm}^2$. Repeatability and high quality of maser are obtained by repetitively measuring the same sample, showing that the lasing sample has good repeatability and high quality. This study plays a certain role in promoting the application of random laser and realizing the high-performance optoelectronic devices.

Keywords: random laser, surface plasmon resonance, graphene, Au nanoparticles

PACS: 42.55.Zz, 71.45.Gm, 78.67.Wj, 78.67.Bf

DOI: 10.7498/aps.71.20211613

^{*} Project supported by the Shandong Natural Science Foundation, China (Grant No. ZR2020QF083) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12174211, 12174212).

[†] Corresponding author. E-mail: lvhao@qust.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: phwangxia@163.com