金属纳米结构增强荧光的研究进展

吴江宏^{1,2},程培红^{1*},张 驰³,王 啦¹,赵洪霞¹,王敬蕊¹,丁志群¹,鲍吉龙¹

1. 宁波工程学院电信学院,浙江 宁波 315016

2. 浙江大学信电系,浙江杭州 310007

3. 上海出入境检验检疫局,上海 200135

摘 要 金属表面等离子体(surface plasmon)是金属与介质界面处传播的电荷振荡密度波。当振荡频率与激 发光频率相匹配时将产生金属表面等离子体共振,从而能够在金属结构附近产生强烈的消光和近场增强效 应,该效应在表面等离子共振成像、表面等离子体波导、生物传感、光谱增强等方面有着重要的应用前景。 本文综述了金属结构的表面等离子共振效应在增强荧光光谱方面的研究进展。论文首先介绍了金属表面等 离子体增强荧光的机理以及影响荧光增强效果的因素;其次,从用于荧光增强的各类金属纳米结构的角度 分别综述了荧光增强研究的最新进展;最后,介绍了荧光增强在食品检测、环境监测、光学成像、光电器件、 荧光上转换等领域的最新应用情况。

关键词 表面等离子体;金属纳米结构;荧光增强 中图分类号:O43 文献标识码:A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2018)01-0128-06

引 言

荧光是一种光致发光的冷发光现象。金属增强荧光 (metal-enhanced fluorescence, MEF)是指具有特殊形貌、尺 寸的金属结构能使位于其邻近的荧光分子的荧光信号得到增 强的现象。贵金属纳米材料在紫外、可见光范围内有较宽的 局域表面等离子体(localized surface plasmon, LSP)吸收带, 当金属纳米结构在与其 LSPR 频率一致的光激发下,会引起 表面等离子体振荡,致使金属表面产生较强的局域电磁场, 改变吸附于颗粒表面及周围的荧光团的态密度,从而增强荧 光强度。

荧光技术因其灵敏度高和激励方法多样等优点,已被广 泛用于各个领域。20世纪70年代 Drehage等^[1]在粗糙的金 属表面包裹稀土元素 Eu 的化合物时,发现荧光强度增强现 象。1999年,Lakowicz等^[2]通过实验研究金属纳米结构增强 荧光的效果,用理论解释实验现象,奠定了金属纳米结构增 强荧光技术研究的基础。随着金属纳米技术不断进步,基于 纳米结构的增强荧光光谱技术目前已在亚波长光子器件^[3]、 细胞机制跟踪^[4]、生物传感分析^[5-6]、单分子检测^[7]、DNA 表面活性检测^[8]等多个领域得到重要的应用。 本文主要介绍金属纳米结构增强荧光的机制、增强荧光 的各类金属纳米结构、以及近几年金属结构增强荧光在各个 领域的应用。

1 金属纳米结构增强荧光机理

金属增强荧光来源于单个纳米金属粒子或纳米阵列局域 表面等离子共振效应(local surface plasmon resonance, LSPR)。金属中自由电子按其固有频率沿金属表面作协同振 荡,当与一定波长的电磁波作用,表面自由电子集体振荡, 产生 LSPR 现象,使得亚波长金属结构中的光场高度局域 化,表现出特殊的光、电性质^[9]。金属纳米粒子对光的吸收 是价电子与电磁波相互耦合的结果,等离子体以光或热的形 式辐射电磁波能量。调控纳米金属材料形貌尺寸、介质折射 率等参量,LSPR 可实现紫外-近红外波段的吸收可调^[10]。

金属纳米结构与荧光分子的作用可以分成两个过程:一 是金属纳米结构 LSP 近场增强效应导致荧光分子的光吸收 截面大幅提高,第二个过程即辐射特性的改变。Jablonski 能 级图形象地描述了金属纳米结构在增强荧光中的重要作 用^[11],如图1所示。当荧光团或荧光分子位于贵金属表面附 近,荧光分子辐射速率变为 $\Gamma = \gamma | E(w',r)|^2 + k_{m} + k_{m}$ 。 k_{m}

收稿日期: 2016-06-06,修订日期: 2017-01-12

基金项目:浙江省自然科学基金项目(Q14A040006)和宁波市自然科学基金项目(2015A61008)资助 作者简介:吴江宏,1993年生,宁波工程学院电信学院学生 e-mail:21631036@zju.cn

^{*} 通讯联系人 e-mail: peihongcheng@163.com

和 k_m 分别表示自由分子的非辐射跃迁速率和金属纳米结构 引起的辐射跃迁速率,γ表示自由分子的辐射跃迁速率。即 使对量子产率很低的荧光分子,即非辐射速率远远大于辐射 速率,当附近存在距离适当的金属纳米结构时,荧光分子的 非辐射速率得到改变,量子产率增加,荧光寿命降低。而且, 荧光分子的量子产率越低,贵金属纳米结构对量子产率的影响越大,产生的荧光增强效果越明显。同时,不管荧光团本 身量子效率的高低,金属纳米结构的存在均可以显著降低荧 光团的荧光寿命^[12]。





荧光增强现象受金属纳米结构 LSP 共振波长及荧光团 与纳米结构距离(d)的影响^[12]。金属纳米结构 LSP 共振波长 由材料种类、形貌、尺寸等因素决定,LSP 共振波长与荧光 分子的辐射波长耦合时,荧光量子产率增加显著。Abadeer 等^[13]在金纳米棒表面包裹二氧化硅,改变二氧化硅厚度,控 制纳米棒与近红外荧光分子的距离。如图 2,改变纳米棒的 长径比将 LSP 共振波长限定在 530~850 nm 范围,显然增强 荧光的强度依赖于二氧化硅的厚度和 LSP 共振波长,当金纳 米棒长径比为 4.5, LSP 共振波长为 776 nm,二氧化硅厚度 为 17 nm 时,荧光强度可增强 10 倍。



2 用于荧光增强的金属纳米结构

2.1 金属颗粒

金属纳米颗粒是比较常见的结构,随着纳米科学的发展,人们可以合成各种不同形状和尺寸的纳米颗粒,目前报道的颗粒类型主要有:(1)纳米棒^[14],Khatua等^[15]制备了宽25 nm,长39~60 nm 金纳米棒,其中25 nm×47 nm 的结构在633 nm 的光源激发下可以使结晶紫荧光增强最大值达到

110 倍。(2)纳米球,王静静等^[16]制备了纳米银球,在 0.4% 的全血溶液中加入 0.9 mL 银胶后,荧光强度增强 5.3 倍。 Khan 等^[17]将纳米球和荧光材料混合后,荧光强度明显增 强。(3)其他形状的纳米结构,Khan 等^[17]通过改变 PH,合 成正方体,六面体等多种金属纳米结构,且不同形状的纳米 结构可以实现不同波段的荧光增强。

2.2 Core/shell 核壳结构

Core/shell 结构具有很高的水溶性,在近些年的研究中 得到广泛应用。Core/shell 是指在纳米球核表面包裹一层纳 米量级的球壳或者颗粒,常见的结构有:(1)金属球核表面 包裹介电球壳,如 Ag@SiO₂^[18],Au@SiO₂^[19],将荧光分子 掺杂在介电球壳内,控制球壳厚度调节金属与荧光团的距 离。Zhang 等^[20]研究发现 Ag 球核约为 60 nm、SiO₂ 层厚度 为 25 nm 时可获得最强的荧光增强;(2)介电核表面包裹金 属球壳,如 NaYF₄:Yb,Er @SiO₂@Au^[21],Fuji等用理论 计算了不同厚度 Au 包裹下该复合结构的辐射衰减率、非辐 射衰减率、局域电场增强因子,发现在 Au 厚度为 7.5 nm 时,局域电磁场增强因子最大,荧光增强效果最好。

2.3 金属薄膜和周期性结构

在玻璃、石英等衬底上生长薄膜,控制薄膜厚度实现荧 光增强最优化。尹永琦^[22]在 Si 衬底上生长 ZnO 纳米棒再沉 积 Ag 薄膜,发现 Ag 薄膜生长时间为 10 min 的结构使得 R6G 荧光增强 47 倍。Saboktakin 等^[23]利用电子束蒸发在玻 璃基底上生长 Au 薄膜,在薄膜上刻蚀出 2 mm 的周期性纳 米小孔,将荧光纳米颗粒 NaYF₄: Yb³⁺,Er³⁺ 组装在小孔 内。当 Au 薄膜厚 30 nm,孔径为 110 nm 时荧光强度增强 35 倍。

周期性金属光栅也是一种常见的增强荧光结构。Lu 等^[24]在200 nm的银膜上生长10 nm的金薄膜后,刻蚀出宽 410 nm、深20 nm、周期为830 nm的光栅结构。在光栅表面 生长Si₃N₄隔离层抑制金属表面的发光猝灭,最后生长 NaYF₄:Yb³⁺,Er³⁺荧光层。当NaYF₄颗粒直径为30 nm 时,NaYF₄:Yb³⁺,Er³⁺在绿光、红光波段的荧光强度分别 增强16 倍和39 倍。

3 荧光增强技术的应用

3.1 食品检测

荧光光谱法具有检测成本低、仪器设备轻便、样品处理 简单、通用性好、不需要设计专门的探针以及灵敏度高等优 点,被广泛应用在各类食品的检测中^[25-28]。同时,该方法要 求被检测的分子体系必须有较高的光子发射率,而大部分荧 光材料的量子产率低、荧光寿命长。金属纳米结构的 LSPR 可以改变分子辐射、非辐射衰减,因此可以在荧光分子体系 中引入金属纳米结构,从而获得荧光量子产率的提高和荧光 辐射速率的提升^[19]。

赵进辉等^[29]将纳米银粒子(AgNPs)和乳化剂(OP-10), 添加到土霉素(OTE)与铕粒子(Eu)生成的配合物中,形成 AgNPs+OP-10+OTE+Eu体系(1),体系(1)中 Eu³⁺的荧 光特征峰比OTE+Eu体系增强8倍,加入鸭肉提取物后建 立了OTE浓度与617 nm 处荧光峰面积之间的线性回归方 程,实现鸭肉中OTE 残留量的快速测定。该小组^[30]也用类 似方法,通过 AgNPs 增强荧光强度,实现鸡蛋蛋清中土霉 素含量的测量。Hu等^[31]利用纳米 Au 颗粒实现赭曲霉毒素 检测,赭曲霉毒素对 Au 颗粒在液体中的分散特性有很大影 响,导致纳米 Au 的 LSPR 波长发生红移或者蓝移,改变体 系的荧光光强。Li等^[32]采用类似的办法实现了对牛奶中三 聚氰胺的检测。

3.2 环境检测

有机物和重金属是水体污染的两个重要方面[33],会对 摄入者产生巨大的危害[34],必须通过检测手段防止生物摄 入超标准的水源。Praveeen 等^[7]以复合纳米粒子 Gd₂O₃: Eu @MPA为供体,金纳米粒子(AuNR)为受体,形成复合纳米 结构(Gd₂O₃: Eu@AuNR),并将三硝基甲苯(TNT)修饰在 复合纳米粒子表面。在水溶液中测得整个体系的荧光强度与 TNT 浓度有关,浓度值为 40 nmol • L⁻¹ 时荧光强度增强 4 倍,这是因为TNT 破坏 AuNR-LnNP 体系的能量共振转移 效应, TNT 浓度小于 11.88 nmol • L⁻¹体系输出的荧光强度 与浓度呈良好的线性。Cheng 等^[19]在六角介孔硅胶中装入 Au和Ag纳米颗粒,形成复合纳米材料HMS-Ag(Au),再 用罗丹明衍生物(R)将 HMS-Ag(Au)纳米结构官能化, 形成 尺寸大约为 300 nm 的 HMS-Ag(Au)-R 复合纳米结构。如图 3,该结构的相对荧光强度与 Hg²⁺浓度呈线性关系,且纳米 Ag(Au)浓度为2%Wt时,获得最强的增强效果,分别可现 实荧光强度增强 4.58 倍和 2.93 倍,由于纳米 Ag 和 Au 的 等离子体共振波长的不同,导致相似结构获得不同的增强效 果;在一定范围内 EF 与 Hg²⁺浓度呈良好的线性关系,从而 实现 Hg²⁺浓度的测量。

3.3 光学成像

生物成像主要有 X 射线成像^[36]、核磁共振成像^[36]、生 物光学成像^[37]、放射性核素成像^[38]、生物组织质谱成像^[39]、 荧光成像^[40]等。荧光成像因具有高灵敏度、高选择性、所得 信息丰富等优点成为迅速发展的成像技术之一。贵金属由于 具备较好的生物相容性、无毒性^[41],以及存在表面等离子体



- 图 4 (a) 基于表面等离子体共振能量转移的肝素选择性检 测示意图^[43];(b) 叶酸修饰胰蛋白酶-金纳米簇用于体 内肿瘤成像示意图^[43]
- Fig. 4 (a) Schematic illustration for selective detection of heparin based on surface plasmon enhanced energy transfer between cyst-Au NPs and try-AuNCs^[43]; (b): Schematic illustration for the application of folic acid modified try-AuNCs for in vivo cancer imaging^[43]

Au NPs 的理化性质与细胞膜的生物学效应密切相关, Wang 等^[42]解释了 Au NPs 进入细胞内的两种途径: 受体介 导细胞摄粒作用和吞噬细胞内化作用。Liu 等^[43]用胰蛋白酶 修饰金纳米簇,用半胱胺修饰金纳米颗粒,设计了基于肝素 介导的两种结构能量转移的荧光传感器,如图 4(a)所示。胰-金结构带负电,胺-金结构带正电,库伦引力确保两种结构能 发生荧光共振能量转移。加入带负电的肝素, 使纳米粒子聚 集, SPR 吸收峰红移;并且拉开了两种结构的距离, 使量子 效率显著增加,增强荧光强度。在图 4(b)中,将叶酸固定在 胰蛋白酶-金纳米簇表面,改善纳米簇的特异性和亲和性, 将形成的 FA-try-AuNCs 结构注入荷瘤小鼠体内, 如图 5 所 示。图 5(b)和(c)表明:正常裸鼠注入 FA-try-AuNCs 结构 5 min 后荧光强度达到最强,肿瘤裸鼠在注入 30 min 后荧光强 度达到最强。图 5(a)和(c)表明 FA-try-AuNCs 结构可以在 裸鼠体内扩散,随着 AuNCs 浓度减小,荧光增强效果减弱; 12 h 后荧光几乎消失,可能是因为 FA-try-AuNCs 结构自身 的降解以及被裸鼠代谢。该结构可以实现特异性活体荧光成 像^[43]。Chandirasekar 等^[44]将 AuNCs 吸附在荧光素表面,通 过被动扩散进入细胞体内,实现生物成像应用。AuNCs浓度 为 100 μL • mL⁻¹ 时荧光增强效果最好, AuNCs 浓度超过 100 μL·mL⁻¹,荧光增强效果不再随浓度增加而增强。



Fig. 5 In vivo time-denpendence tumor imaging of Hela tumorbearing nude mice and normal nude mice by the NIR fluorescence imaging system

(a): The FA-try-AuNCs fluorescence probe was intratumorally injected into the tumor-bearing mice; (b): The left forelimb region of the normal nude mice; (c): Tumor-bearing mice; The red cyde and green cycle indicate the tumor site and infection site respectively

3.4 光电器件

李曜均等^[45]在玻片上先沉积纳米 Ag 颗粒,再通过控制 转速沉积不同厚度的 CdS 量子点,设计了 CdS 照明器件。将 玻片与 9 个 395 nm 的激发光源组装,得到发光效果不同的 器件,如图 6。对比图 6(a)和(b),纳米 Ag 颗粒对量子点有 明显的荧光增强效果;并且,随着量子点厚度增加,荧光增 强效果更明显,且发射波长红移,这主要是因为荧光增强效 果受到 Ag 颗粒与量子点距离的影响。He 等^[46]将纳米 Ag 薄 膜运用在有机光电器件中,并在薄膜厚度为 4 nm 时,发现 器件荧光强度最强。

3.5 荧光上转换

频率转换一直是光学领域的研究热点,随着 NaYF4 和 NaGdF₄等上转换材料的出现,使得荧光上转换技术成为近 年的研究热点。由于荧光上转换效率低,难以发展应用,近 些年诸多学者从理论和实验两方面证实了贵金属纳米材料增 强荧光上转换现象^[47-48]。Luu 等^[49]将 NaYF₄: Tm: Yb 纳 米粒子嵌入甲基丙烯酸甲酯并生长在金纳米柱表面,在近红 外光源激发下,产生可见光波段的荧光。Lee 等[50]设计了金 属纳米盘--绝缘层--金属薄膜(MIM)带隙等离子激元结构, 如图 7 所示,在石英基底上生长厚为 200 nm 的银薄膜,再生 长厚度为 60 nm 的 SiO₂ 层, 并嵌入 NaYF₄: Yb³⁺, Er³⁺纳 米颗粒作为荧光上转换层,银纳米盘厚度为 30 nm,顶层厚 度为 60 nm, 表面嵌入四甲基庚二酮纳米材料作为荧光下转 换层。在石英基底上直接生长荧光上转换层作为参考,用波 长为 970 nm 激发,发现 MIM 结构的荧光光谱在 539 和 659 nm 处比参考样品分别增强 174 和 115 倍。荧光增强主要是 因为:(1)银薄膜增强反射光,使得上转换层的吸收增强; (2)能量传递速率增加;(3)纳米银盘的表面等离子体共振增 强 NaYF₄:Yb³⁺,Er³⁺纳米颗粒中电子的跃迁。Feng 等^[51] 采用金纳米棒增强荧光上转换纳米颗粒 NaYF₄: Yb, Er 的 上转换效率,金纳米棒层的厚度为8nm时,荧光增强因子 达到最大值 10.6。此外, 金属球壳结构增强 NaYF4 上转换 效率也有报道^[52]。



Fig. 6 Photoluminescence of different device





4 总结与展望

综述了近年来金属增强荧光的研究进展,主要介绍了金 属表面等离子共振增强荧光的机理、常见的增强荧光的结构 等。并且,从环境监测、食品检测、光学成像、光电器件、荧 光上转换五个角度介绍了金属增强荧光的应用。总的来说, 金属纳米结构在增强荧光方面已经展示了诱人的前景,但是 金属增强荧光技术仍存在一些挑战:例如,荧光增强效果取 决于纳米材料的形貌和尺寸,对制备工艺要求严格,同时表 征纳米材料形貌所需的设备成本非常昂贵;其次,荧光增强 效果受到金属材料与荧光分子距离的影响,在不同的结构、 不同的金属种类,同样的距离取得的效果并不相同,目前尚 无法通过理论预测某一尺寸、种类、形貌的金属纳米粒子对 不同荧光分子的增强效果;最后,在单分子测量过程,还存 在测量物质的浓度、种类受到限制的问题;在生物应用中, Au/Ag结构对细胞具有靶向性的机制尚不清楚;尽管如此, 可以预见,随着纳米工艺以及荧光增强机制的理论进一步成 熟,金属增强荧光会成为更多领域研究的工具。

References

- [1] Drexhage K H. In: Wolf E, ed. Progress in Optics. Amsterdam: North-Holland, 1974. 161.
- [2] Turner E H, Lauterbach K, Pugsley H R, et al. Anal. Chem., 2007, 79: 778.
- [3] LÜ Hui, GUAN Cheng-gang, TAN Bao-hua(目 辉, 官成钢, 谭保华, 译). Nanotechnology for Photovoltaics(纳米光伏技术). Beijing: Publishing House of Electronics Industry(北京: 电子工业出版社), 2014.
- [4] Huang Q, Huang Z, Meng G, et al. Chem. Commun., 2013, 49: 11743.
- [5] Abel B, Coskun S, Mohammed M. Journal of Physical Chemistry C Nanomaterials & Interfaces, 2015, 119: 675.
- [6] ZHENG Li, ZHU Jin, WU Fei, et al(郑 莉,朱 进,吴 飞,等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2014, 34 (6): 1477.
- [7] Praveeen G, Lekha G, Visakh V, et al. J. Nanopart. Res., 2014, 16: 2217.
- [8] Zhou J, Li J, Hong Y, et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23: 456.
- [9] Wu T F, Yang S B, Li X F. The Journal of Physical Chemistry C, 2013, 117: 8397.
- [10] Tang X L, Tsuji M, Jiang P. Colloids and Surf. A: Phys., Eng. Aspects, 2009, 338. 33
- [11] XU Ling-ling(徐玲玲). High-Precision Fluorescence Lifetime Imaging Method and Its Applications(高精度荧光寿命成像方法及应用). Huazhong University of Science & Technology(华中科技大学), 2013.
- [12] Goldys E, Barnett A, Xie F, et al. Applied Physics A, 2007, 89: 265.
- [13] Abadeer N S, Brennan M R, Wilson W L, et al. ACS Nano, 2014, 8(8): 8392.
- [14] Zhao T, Yu K, Li L, et al. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6: 2700.
- [15] Khatua S, Pedro M R Paulo, Yuan Haifeng, et al. ACS Nano, 2014, 8(5): 4440.
- [16] WANG Jing-jing, WU Ying, LIU Ying, et al(王静静,吴 莹,刘 莹,等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2016, 36(1): 140.
- [17] Mohammad Salman Khan, Vijay Raman Chaudhari. Journal of Fluorescence, 2014, 24: 751.
- [18] Jang E, Su M, Koh W. Analyst, 2015, 140: 3375.
- [19] Cheng Z H, Li G, Liu M. Sensors and Actuators B, 2015, 212: 495.
- [20] Fujii M, Nakano T, Imakita K, et al. J. Phys. Chem., 2013, 117: 1113.
- [21] Zhang H, Lin X, et al. Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2015, 151, 716.
- [22] YIN Yong-qi(尹永琦). Photoluminescence and Surface Enhanced Spectroscopy of Surface-Modified ZnO Nanorods(表面修饰 ZnO 纳米棒 光致发光和表面增强光谱效应研究). Harbin Institute of Technolgy(哈尔滨工业大学), 2014.
- [23] Saboktakin M, Ye X, Chettiar U, et al. ACS Nano, 2013, 7: 7186.
- [24] Lu D, Cho S, Ahn S, et al. ACS Nano, 2014, 8(8): 7780.
- [25] Zemtsova G, Montgomery M, Levin M. PLoS One, 2015, 10(1): 0116658.
- [26] Chen H, Parimelalagan M, Lai Y L, et al. Journal of Molecular Diagnostics, 2015, 17(6): 722.
- [27] Soaresa S, Amarala J S, Beatriz M, et al. Meat Science, 2015, 94(1): 115.
- [28] Yadav R, Paria A, Mankame S, et al. Molecular & Cellular Probes, 2015, 29(6): 442.
- [29] ZHAO Jin-hui, YUAN Hai-chao, HONG Qian, et al(赵进辉, 袁海超, 洪 茜, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2014, 22(11); 2902.
- [30] ZHAO Jin-hui, YUAN Hai-chao, HU Qi, et al(赵进辉, 袁海超, 胡 琪, 等). Chinese Journal of Laser(中国激光), 2015, 42(2): 0215002-1.
- [31] Yang C, Wang Y, Marty J, et al. Biosensors & Bioelectronics, 2011, 26(5): 2724.
- [32] Li L, Li B, Cheng D, et al. Food Chemistry, 2010, 122(3): 895.
- [33] XIE Wen-ping, ZHU Xin-ping, ZHENG Guang-ming, et al(谢文平,朱新平,郑光明,等). Environmental Science(环境科学), 2014, 35 (12): 4644.
- [34] QIN Hua-wei, LIU Ai-ying, GU Wei-li, et al(秦华伟, 刘爱英, 谷伟丽, 等). Asian Journal of Ecotoxicology(生态毒理学报), 2015, 10 (6): 287.
- [35] Mannes D, Benoit C, Heinzelmann D, et al. Archaeometry, 2014, 56(5): 717.

- [36] Wang S F, Zhu Y X, Shao Q, et al. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2016, 117: 255.
- [37] Sonya E L Craig, James Wright, Andrew E Sloan, et al. World Neurosurgery, 2016, 90: 154.
- [38] Park J, Pahk K, Kim S, et al. Oncology Letters, 2015, 10(2): 1131.
- [39] Zhao Y S, Li C. Current Drug Metabolism, 2015, 16: 807.
- [40] Wang J L, Zhang G, Li Q, et al. Scientific Report, 2014.
- [41] Ayala-Orozco C, Liu J G, Knight M W. Nano Letters, 2014, 14: 2926.
- [42] Wang P, Wang X, Wang L, et al. Science and Technology of Advanced Materials, 2015, 16: 15.
- [43] Liu J M, Chen J T, Yuan X P. Anal. Chem., 2013, 85: 3238.
- [44] Chandirasekar S, Chandirasekarn C, Sudhandiran G, et al. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2016, 143: 472.
- [45] LI Yao-jun, SHEN Hao, FENG Zong-yan, et al(李曜均,沈 浩,冯宗焱,等). Journal of South China Normal University(华南师范大学学报), 47(6): 32.
- [46] He X, Wang W, Li S, et al. ECS Solid State Letters, 2015, 4: 10.
- [47] Qiu H, Yang C, Shao W, et al. Nanomaterials, 2014, 4: 55.
- [48] Park W J, Lua D W, Ahna S M. Chem. Soc. Rev., 2015, 44: 2940.
- [49] Luu Q A, Hor A, Fisher J, et al. The Journal of Physical Chemistry C, 2014, 118: 3251.
- [50] Lee K T, Park J H, Kwon S J, et al. Nano Letters, 2015, 15: 2491.
- [51] Feng A L, Lin M, Tian L M, et al. RSC Adv., 2015, 5: 76825.
- [52] Fujii M, Nakano T, Imakita K, et al. J. Phys. Chem. C, 2013, 117: 1113.

New Development of Metal Nanostructures Enhanced Fluorescence

WU Jiang-hong^{1,2}, CHENG Pei-hong^{1*}, ZHANG Chi³, WANG La¹, ZHAO Hong-xia¹, WANG Jing-rui¹, DING Zhi-qun¹, BAO Ji-long¹

- 1. Department of Electrical Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo 315016, China
- 2. Department of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310007, China
- 3. Shanghai Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Shanghai 200135, China

Abstract Surface plasmon (SP) is electron density oscillation wave that propagates at the metal-dielectric interface. When the oscillation frequency matches with the incident light frequency, surface plasmon resonance effects are induced. It leads to strong light extinction and field enhancement near the metal structures. SP resonance effect can be applied to SP imaging, SP waveguide, biology sensing and spectral enhancement. The research progress of metal nanostructure enhanced fluorescence was reviewed. Firstly, the mechanism of metal enhanced fluorescence and the factors influencing fluorescence enhancement were introduced. Then, the research progress in fluorescence enhancement using different metal structures was reviewed. Finally, some new applications of fluorescence enhancement such as food testing, environmental testing, imaging optics, optoelectronic devices, fluorescence upconversion were introduced.

Keywords Surface plasma; Mental nano-structure; Fluorescence enhancement

(Received Jun. 6, 2016; accepted Jan. 12, 2017)

* Corresponding author