

某些液相纳米微粒的光谱特性研究及分析应用

袁伟恩, 蒋治良

(广西师范大学 材料科学与工程研究所, 广西 桂林 541004)

摘要: 介绍了液相纳米微粒的吸收、荧光和共振散射光谱特性研究现状及纳米微粒在共振散射光谱分析中的应用, 引用文献 125 篇。

关键词: 液相纳米微粒; 光谱特性; 共振散射效应

中图分类号: O657.33

文献标识码: A

文章编号: 1006-3757(2004)04-0193-11

自美国著名的物理学家、化学家、诺贝尔奖金获得者理查德·费曼(Richard P. Feynman)在一次演讲中首次提出“纳米”概念以来, 纳米科技已得到飞速发展。纳米科技已成为 21 世纪三大科技之一^[1]; 纳米材料被认为是 21 世纪最有前途的材料之一; 纳米微粒是当今世界的研究热点之一。液相纳米微粒是纳米化学的研究基元, 它的研究对生命科学研究和可持续发展具有重要意义。本文介绍了某些液相纳米微粒的光谱特性研究现状及纳米微粒在共振散射光谱分析中的应用。

1 纳米微粒研究概况

纳米微粒显示出一系列特殊物理和化学性质, 如量子尺寸效应^[2]、导致半导体纳米材料的吸收光谱的边界发生蓝移^[3]、表面效应^[4]、小尺寸效应^[3]和宏观量子隧道效应等, 这是它具有广泛应用的基础。

纳米微粒的制备方法层出不穷, 有固相法、气相法、液相法三大类。其中液相法研究的最多, 如微波合成法^[5]、胶体化学法^[6]、IM 膜法^[7]、反向胶束法^[8]、溶胶-凝胶法^[9]。反向胶束法的反应条件温和, 对控制纳米微粒的尺寸具有独特的优势^[10], 有利于纳米微粒如 CdS 的生长^[11], 并可以实现纳米微粒的二维和三维有序排列^[12]。也有用十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)作表面活性剂制备反向胶束的报道^[13]和四元反向胶束合成半导体纳米微粒的报道^[14]。我们采用聚四氟乙烯高压罐和家用微波炉已成功的合成了一

系列纳米微粒, 例如高稳定的金纳米、银纳米、钯纳米微粒、二氧化钛纳米微粒和磁性三氧化二铁等纳米微粒^[15~18]。采用光化学法合成绿色的、黄色的、蓝色的银纳米微粒也有报道^[19~24]。Troupis^[25]以异丙醇作光还原剂和 SiW₁₂O₄₀作催化剂制备了稳定的金、银、钯、铂纳米微粒。水热反应法也有用于羟基磷灰石^[26]、钛酸锶纳米微粒^[27]、 α -Fe₂O₃ 纳米微粒^[28]、纳米氧化亚铜的报道等^[29]。

纳米微粒表征方法有扫描隧道电镜(SFM)^[30]、透射电子显微镜(TEM)^[31]、原子力显微镜(AFM)^[32]、激光技术^[33]和谱学分析技术等。近年来, 吸收光谱、拉曼光谱、共振散射光谱等成为研究纳米微粒的重要手段, 尤其是最近发现的某些液相纳米微粒的共振散射和荧光效应, 进一步丰富了液相纳米微粒光谱学的内容。

2 纳米微粒光谱特性

人们注意到, 当一束光通过物质时, 将发生吸收、反射、散射和透过。纳米微粒作为物质的一种形式, 也必定发生上述作用。一些纳米微粒呈现颜色, 这为吸收光谱研究纳米微粒提供了条件, 也使得吸收光谱成为研究纳米微粒(特别是液相纳米微粒)最简便经济的研究手段。散射光是一种光致发光, 主要有瑞利(Rayleigh)散射、布里渊散射、拉曼散射。第一种散射可认为是弹性散射, 无能量损失; 后二种为非弹性散射, 有能量损失。瑞利(Rayleigh)散射光的

收稿日期: 2004-05-09; 修订日期: 2004-06-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目(200365001)及广西自然科学基金项目(014401)。

作者简介: 袁伟恩, 上海交通大学博士生。

主要特点是散射光的频率不变,其强度除了与散射方向有关外并与波长的四次方成反比。当散射介质中存在声波引起介质的密度涨落时,散射光中瑞利谱线附近会出现对称地分布着分离谱线,这些谱线与入射光谱线的频率差值,由声波的速度来决定的,此为布里渊散射。拉曼散射是指入射光与分子振动、固体晶格振动或其他各种元激发(如杂质、等离子体激发、磁振子、极化声子、激子等)相互作用所引发频移的散射光。在拉曼散射中,散射体可使入射光子能量减小或增大;减小或增大的量由散射体的能级间距离来决定^[34]。共振瑞利(Rayleigh)散射(共振散射)是瑞利散射的一种特例,当入射光或激发光的能量与纳米粒子的界面超分子能带中的电子激发态和基态之间的能量的差值相等或相近时,导致瑞利散射信号大大增强的现象^[34]。共振非线性散射是指在入射光波长的 1/2 和 3/2、1/3、2/3 分频、2 倍频、3 倍频等处也能产生强烈的散射现象^[35,36]。分子荧光已知很久,纳米粒子荧光或半导体荧光量子点则是人们近年发现的光谱现象,并引起人们极大的研究兴趣,在生化分析中获得了广泛应用。最近,我们研究发现一些缔合微粒存在荧光猝灭效应,而一些纳米微粒如液相银纳米微粒、螯合纳米微粒存在界面荧光效应,且荧光与共振散射存在内在联系。

2.1 纳米微粒的紫外可见吸收光谱

纳米微粒的紫外可见吸收光谱研究表明,纳米微粒的量子呈色效应可产生表面等离子体共振吸收峰(简称为共振吸收峰)^[37]。目前,紫外可见吸收光谱已成为液相纳米微粒表征的重要手段之一。主要用在以下几个方面有用:第一是通过吸收峰的位置的变化,可以了解纳米微粒能级结构变化^[1]。如在纳米微粒中,空间限域结果导致连续体相能带变化为分离或部分分离的能级结构,表现在对光的起始吸收向短波方向移动,即所谓“蓝移”现象^[38]。如半导体 CdS、PbS 和 ZnS 纳米微粒的共振吸收峰与它的粒径有关,即随着粒径的减小,其吸收峰发生蓝移^[39]等。第二是吸收光谱也可以用来表征纳米的粒径分布。例如有人报道水溶液中银纳米微粒最大吸收峰约在 390 nm,当加入 C₉H₁₉SH 吸附到银纳米微粒表面上,则最大吸收峰红移到 436 nm,吸收峰对称变小,半高度为 80 nm 左右,说明粒径分布较窄^[40]。第三是测定纳米微粒的粒径。如对于比较均匀球形的金纳米微粒来说,它的粒径与最大吸收峰的波长存在一定的关系,根据此可以测定金纳米微粒的粒

径^[34]。紫外-可见吸收研究表明,吸收峰由单一的等离子共振吸收峰变为多重的多极吸收峰时,胶体溶液也随之显示出不同的颜色^[41]。对于半导体纳米粒子,可见-紫外吸收光谱对确定其微粒尺寸是强有力的工具^[42,43]。

采用溶胶-凝胶法制备出不同质量比的 Ti/Si 复合纳米粉末,有利于半导体光生电子-空穴对的分离和量子效率的提高,使微粒的稳定性增大,比表面积和表面缺陷增加,光谱吸收明显蓝移,极有利于光催化降解水中或空气中的 NO,这在环境保护等方面有着极广泛的实用价值。史守华等^[44]对 Ag-MgF₂ 银纳米微粒的吸收光谱进行研究表明,Ag 纳米微粒的表面等离子共振吸收峰出现在 412~417 nm 波段范围内。随着 Ag 组分增加,吸收峰强度下降,呈现轻微红移并且逐渐宽化。

2.2 纳米微粒的拉曼光谱研究简介

1928 年,拉曼在实验上发现单色光投射到物质中被散射时,散射谱中除了入射频率外还包含与入射光频率不同的成分,这一现象称为拉曼散射。拉曼散射光谱,可以揭示纳米微粒种的空位、位错、间隙原子、晶界和相界等关系,通过计算可望得到纳米微粒表面原子的具体位置^[1]。拉曼散射已成为化学、材料、固体物理研究的重要手段之一,每隔 2 年美国《分析化学》的有关综述就是一个很有力的说明。

纳米微粒的表面拉曼散射增强(SERS)效应是近年来的研究热点之一。文献对银纳米微粒表面增强因素进行了研究^[45]。徐云峰等^[46]研究结果表明,SERS 信号的强度随露出表面纳米线的长度的增加而变大,到一定程度后又逐渐减弱。只有具有合适长径比的纳米线才会有最大的增强。司民真等^[47]研究了 pH 值不同时,异烟酸在 2 种不同电性纳米银上的 SERS 谱,发现随 pH 值的增加,在正电性纳米银上 SERS 增强,而在负电性纳米银上 SERS 减弱直至消失。2 种纳米银上 SERS 谱明显不同,在正电性纳米银上,面外弯曲模式受到增强,而在负电性纳米银上,面内伸缩模式受到增强。通过分析增强谱的差异表明,分子在这两种不同电性胶态纳米银表面上可能分别以平躺及站立方式吸附^[48]。郑军伟等^[49]研究了耦联于纳米银和光滑银表面间的巯基苯胺的拉曼散射增强则与纳米银粒子和光滑银表面的耦合而导致的局部电磁场增强直接相关;及采用表面增强拉曼光谱研究了吸附态微过氧化物酶和细胞色素 c 的光诱导还原。结果表明,吸附于粗糙银电极表面的

过氧化物酶和细胞色素 c 在 413nm 激光连续照射下被部分还原. 光诱导还原可归因于电极表面纳米银粒子的定域表面等离子体吸收使得自由电子受激, 受激电子进而转移进入吸附分子空轨道, 导致吸附蛋白质的还原^[50]. SERS 也用来考察肽和蛋白质吸附在凝胶银上的相互作用行为^[51~53].

2.3 纳米微粒的共振散射光谱

散射光技术在物理化学、高分子化学和细胞生物学中已有应用, 激光技术的出现极大地加速了散射光技术的发展和运用. 但以荧光分光光度计而获得同步散射光谱(200~1000 nm)以及共振散射光谱分析技术的建立则是 20 世纪 90 年代的事^[54]. 尽管同步散射光谱受光源的影响较大, 光源的光辐射强度在 200~1000 nm 内并不相等, 但当共振散射效应较强时, 特征的同步散射峰(即共振散射峰)能够观测, 因此荧光分光光度计仍不失为研究共振散射效应的较好技术. 与国外研究几乎同时, 1995 年西南师范大学刘绍璞等人将此技术应用到离子缔合物的分析, 并在理论上进行了探讨, 获得了较好的效果^[55~57]. 李克安、黄承志等人将此技术应用到生物大分子的分析也得到较好的结果, 并对其产生共振散射增强原因进行了探讨^[58~61]. 但人们对纳米微粒的共振散射光谱涉及较少. 我们率先将此技术应用到液相纳米微粒的研究, 做了大量系统的探索研究^[62~105]. 通过对液相纳米微粒, 明胶、淀粉高分子液体体系、聚丙烯酰胺泡泡气液体体系及烟雾气固体体系等的同步散射光谱研究, 发现液相纳米微粒和超分子的粒径、形貌、吸光特性、折光指数、光源、检测器、同步扫描速度、仪器灵敏度等是影响同步散射光谱的重要因素. 通过比较研究得出, 共振散射效应、光源和检测系统、分子吸收是产生同步散射峰的三个主要因素; 液相纳米微粒或超分子和界面的形成是导致同步散射信号增强的根本原因, 是产生共振散射的前提条件. 共振散射是由于液相纳米微粒(或超分子)界面电子与激励光相互作用的结果. 光在物质中传播时, 物质中存在的界面(如不均匀性)是导致光散射的根本原因. 我们知道, 一个系统受到外界作用, 如果作用与系统的固有振动频率相等或相近就会使之产生大幅度的振动即共振. 共振能够有效积聚能量, 使微弱的作用产生显著的效果. 光与液相纳米微粒相互作用产生的共振散射, 就是由于粒子界面的超分子能带的能量差与激励光的能量(幅值)同量级, 粒子界面的超分子能带中的电子(自由振

动)与光子(振动)耦合而产生共振, 从而导致光与纳米微粒或超分子共振散射峰^[63]. 共振散射效应产生共振散射峰, 有共振散射峰的同时同步散射光谱为共振散射光谱. 研究发现, 一些金属如银和金、非金属如硒、氧化物如三氧化铁、卤化物如卤化银和碘化亚金、缔合物、螯合物纳米微粒存在共振散射效应, 出现共振散射峰. 共振散射效应是导致纳米微粒体系呈色的又一重要原因, 此外液相纳米粒子呈色与共振吸收、荧光等有关.

共振非线性散射(分频散射如二级散射、倍频散射或反二级散射)由刘绍璞教授课题组最先发现, 并将其用于痕量分析. 我们采用荧光分光光度计首次观察到纳米微粒、细胞、细菌的共振非线性散射^[93~101]. 我们研究了分频共振散射和倍频共振散射与(主)共振散射之间的关系; 提出了液相纳米微粒的分频、和频、差频原理; 解释了液相纳米微粒的分频、倍频共振散射现象. 研究了液相银纳米微粒的(主)共振散射峰(7.06×10^{14} Hz, 425 nm)强度(或峰高)、半峰宽度与 1/2 分频共振散射峰($1/2 \times 7.06 \times 10^{14}$ Hz, 850 nm)强度(或峰高)、半峰宽度之间的关系^[63~65]. 选择液相银纳米微粒作为共振散射光谱分布理论研究的模型, 采用密度矩阵法研究了纳米微粒的主共振散射峰与 1/2 分频共振散射峰之间的关系; 研究了金纳米微粒的非线性共振散射和共振散射光强度函数, 提出了金原子团簇分频散射的能级原理; 根据纳米微粒和超分子界面能带理论以及液相纳米微粒的分频、和频、差频原理解释了液相纳米微粒、超分子和细胞的非线性散射现象; 建立了非线性共振散射理论等^[67, 68, 72, 87]; 通过对用超分子界面能带理论解释了金纳米微粒的颜色与粒径的关系^[65]; 建立并验证了共振散射光强度函数^[72]和液相纳米微粒的共振散射强度分布理论^[63].

2.4 纳米微粒的荧光光谱

荧光是一种光致发光现象^[106]. 荧光猝灭是指荧光物质分子与溶剂分子或溶质分子之间所发生的导致荧光强度下降的物理或化学作用过程. 溶液荧光猝灭过程可以分为动态猝灭和静态猝灭. 荧光猝灭主要有: 碰撞猝灭、组成化合物的猝灭、电荷转移猝灭、能量转移猝灭、光化学反应猝灭、自猝灭(当荧光物质的浓度超过 1 g/L 时, 常发生荧光的自猝灭现象, 即浓度猝灭)、转入三重态的猝灭和氧的猝灭.

蛋白质是一种重要的生命物质, 它与金属离子

和药物的猝灭行为研究较多^[107, 108], 如在人体条件下, 用荧光光谱法研究了苯酚磺酞类酸性染料苯酚红、甲酚红、氯酚红、溴甲酚紫、间甲酚紫与人血清白蛋白(HSA)之间的相互作用. 实验表明: 苯酚磺酞类酸性染料对人血清白蛋白的荧光有较强的猝灭作用, 其荧光猝灭主要为静态猝灭, 从荧光猝灭结果求得不同温度下各染料与 HSA 的结合常数 K , 发现染料取代基的引入使 K 值增大, 且随反应温度上升 K 值下降. 由染料与 HSA 反应焓变、熵变, 确定染料与 HSA 的结合主要是静电引力. 依据非辐射能量转移机理, 探讨了不同温度下该类染料与 HSA 相互结合时, 其给体-受体间距离和能量转移效率. 进一步证实了该类反应为单一静态猝灭过程, 且阐明了其猝灭机理是通过能量转移产生的. 但是有些研究工作忽视了 2 个重要因素, 即在其激发波长范围内有吸收的分子可减弱入射光强度而导致荧光减弱(猝灭), 及形成蛋白质缔合纳米微粒而导致的荧光猝灭现象.

近年来, 纳米微粒的荧光光谱的研究有较多报道. 纳米微粒的荧光大致分为三大类: 第一类是由本身有荧光的分子组成的纳米微粒, 这类的特点是不易分解、荧光亮而稳定性高(无闪烁现象)^[109]. 第二类是半导体纳米微粒的荧光(发光量子点, Quantum Dot)^[110], 这类纳米微粒的荧光特点是: 荧光的颜色(荧光峰位置)则由量子点的物理尺度控制^[111], 紫外吸收系数高达 $10^5 \text{ L}/(\text{mol} \cdot \text{cm})$ 数量级. 通过变更纳米材料和微粒尺度, 可使激光诱导荧光覆盖 400~2 000 nm 的光谱范围. 此外发射光谱可调, 荧光寿命较长等^[111]. 如半导体 Si 和 Ge 都属于间接带隙半导体材料, 通常情况下难以发光, 但当它们的粒径分别减小到 5 nm 和 4 nm 以下时, 由于能带结构的变化, 就会表现出明显的可见光发射现象. 粒径越小, 发光强度越强, 发光光谱逐渐蓝移. 如 CdS、 SnO_2 、 Al_2O_3 、 TiO_2 和 Fe_2O_3 等也具有粗晶状态下根本没有的发光现象, 而纳米级则有荧光^[112]. 杨建军等^[113]采用同阳离子共沉淀法制备了 DDP 修饰的 Ag_2S 纳米微粒, 其紫外-可见吸收光谱和荧光光谱表明 DDP 修饰的 Ag_2S 纳米微粒具有显著的量子尺寸效应, 粒子尺寸分布较窄, 粒子表面存在多种表面态能级. 由于其荧光峰谱带较宽, 通常认为这是由于在纳米微粒表面光生电子和光生空穴的复合引起的, 即由纳米微粒的表面态所产生. 第三类是量子点(壳)-量子点(核)结构的荧光. 此类纳米微粒的荧

光特点是: 普遍比单纯的半导体制备的纳米微粒的荧光强度大, 产率高. 主要包括两种: 一种是由高能带隙的量子点材料组成壳, 低能带隙组成的核(即壳的价带能量比核的低)复合纳米微粒. 结果电子和空穴被限在核里. 如 $\text{CdSe}/\text{CdS}(\text{core}/\text{shell})$ ^[114]. 另一种是与前种相反, 组成壳的材料低能带隙的半导体, 组成核的材料为高能带隙的半导体. 使得在核里的比在壳里的价带和导带的能量高或低, 结果一个载体大多数被限制在核里, 另一个则被限制在壳里. 这种核-壳的量子点的光学性质与前种不同, 在近红外有吸收峰, 可以用长波长激发, 而使之发光(在近红外), 荧光寿命比单纯的半导体材料组成的量子点的要长. 如 $\text{CdTe}/\text{CdSe}(\text{core}/\text{shell})$ 和 $\text{CdSe}/\text{ZnTe}(\text{core}/\text{shell})$ 的荧光波长比相应核的要长, 这种荧光不是由于“量子陷阱”所致, 而是通过核-壳界面的电子-空穴对整合辐射的结果. 发射的能量取决于两种形成核和壳的材料抵消的能带(补带), 因此发射的能量比组成的材料要低. 量子限制效应受到壳的厚度和核的大小, 因此其量子荧光可以通过改变壳的厚度和核的大小来调控制. $\text{CdSe}/\text{CdTe}(\text{core}/\text{shell})$ 的发射波谱通过改变壳厚度和核的大小, 可以覆盖 700~1 000 nm, 平均寿命 57 ns 比 CdTe 的长 47.4 ns, 而辐射寿命和非辐射寿命则是 CdTe 的 120 和 3.6 倍, 他们认为是长辐射寿命是由于慢的电子-空穴整合激发, 而非辐射的则是由于在量子点表面上的“量子陷阱”非辐射隧道受迫的结果^[115]. 还有 $\text{CePO}_4/\text{Tb}/\text{LaPO}_4(\text{core}:\text{shell})$ 量子产率达 70% 的报道^[116]. 此外, 我们的研究表明, 有些液相缔合纳米微粒体系存在荧光猝灭, 也有的金属(如银)纳米微粒存在荧光效应^[77, 84, 89, 91, 95, 96, 101]. 在纳米尺寸研究金属、综合微粒和整合微粒的荧光猝灭及其应用报道少见, 研究发现磷钼杂多酸、钼同多酸与 HSA 形成的缔合纳米微粒导致体系 HSA 的荧光猝灭, 设计了新的实验方法, 从理论上探讨了机理^[89].

近年来还有一种奇特的发光稀土纳米材料报道, Stephan 等^[114]报道的磷酸稀土盐纳米微粒的光子反转发光现象, 即用近红外光激发出可见(蓝、绿和红)荧光. 这种发光现象还有参杂的稀土氧化物和卤化物. 如 Patra 等^[117]报道的不同浓度 Er^{3+} 参杂到 ZrO_2 形成的纳米微晶, 可用 980 nm 光激发使之发射出 550 和 670 nm 的绿光和红光的光子反转发射的报道, 并认为是双光子激发吸收机制.

3 纳米微粒在光谱分析中的应用

近年来, 纳米微粒在光谱分析中的应用得到快速发展. 无论是吸收、拉曼、共振散射还是荧光光谱等都在分析应用上得到较好的效果. 分光光度法已成为分析实验室常规定量方法之一. 基于形成纳米微粒的光度法已用于测定微量金、银、阳离子表面活性剂、药物等^[81]. 纳米微粒的 SERS 应用非常广泛^[52, 53]. SERS 作为一种高灵敏度和高选择性的化学和生化定量分析技术已用于环境污染物及农药的检验及 DNA 加合物毒性监测. 以液相纳米微粒载体, 采用 SERS 技术可检测单个罗丹明 6G 分子和结晶紫分子^[51~53].

共振散射光谱在生化、环境、药物检测等领域已有报道. 黄承志等^[118]综述了有机染料分子的聚集及其在生物大分子上的堆积以及生化分析应用. 马春其等^[119]也综述了在生物化学分析中的应用. 刘绍璞等^[55~57]将此技术应用到痕量缔合物分析得到

较好结果. 近年来, 我们将共振散射光谱分析与纳米微粒结合起来, 建立了纳米微粒共振散射光谱分析理论. 在探索新的共振散射光谱分析体系应注意两个问题: 第一个是被分析物质参与共振散射光谱增强或减弱的纳米反应或超分子反应均可用于共振散射光谱分析, 而这种共振散射增强的体系较好且种类较多, 是研究的主流. 第二个是能形成均匀稳定的纳米微粒的化学反应体系. 这也是很多胶体(沉淀)体系不能直接拿来共振散射光谱分析的重要原因. 此外我们还对分析方法的选择性作了研究探讨^[63], 并提出缔合微粒共振散射光谱分析新方法. 为提高方法的灵敏度和选择性, 建立了催化共振散射光谱分析、螯合物共振散射光谱分析和免疫共振散射光谱分析新方法. 一些纳米微粒的共振散射光谱在分析上的应用如表 1.

纳米微粒的荧光在分析上应用已有相关文献综述^[109]. 在生化分析应用方面, 主要是 DNA 和蛋白质生物标记和定量测定. 纳米微粒(纳米微晶)的荧

表 1 液相纳米微粒共振散射光谱研究及其分析应用

Table 1 RSS of some nanoparticles in liquid phase and their analytical applications

测定物质	条件	测定范围	检出限	样品	文献	
P	0.14 mol/L H ₂ SO ₄	0.2~20 μg/mL		水和茶叶	[78]	
Cd ²⁺	0.18~0.36 × 10 ⁻⁴ mol/L Rh 6G	0~0.04 μg/mL	(SOS) 0.41~0.82 ng/mL			
	0.16~0.32 × 10 ⁻⁴ mol/L RhB	0~0.06 μg/mL	(FDS) 0.57~1.09 ng/mL		[92]	
	0.15~0.30 × 10 ⁻⁴ mol/L BRhB	0~0.06 μg/mL				
	0.16~0.32 × 10 ⁻⁴ mol/L ERhB	0~0.06 μg/mL				
Cl ⁻		2 × 10 ⁻⁷ ~8 × 10 ⁻⁶ mol/L			[67]	
Se		8 × 10 ⁻⁹ ~8 × 10 ⁻⁸ mol/L		头发	[63]	
HSA	2.0 × 10 ⁻³ mol/L HCl	0~12 μg/mL				
	8.0 × 10 ⁻⁵ mol/L [Fe(CN) ₆] ³⁻			人血清	[64]	
C		0.45~45 mg/L			[78]	
蛋白质	0.15 mmol/L PMA	HSA 0.1~10 × 10 ⁻⁶ mol/L	0.1 μg/mL			
		Casein 0.3~50 × 10 ⁻⁶ mol/L	0.1 μg/mL	人血清	[79]	
		γ-G 0.1~10 × 10 ⁻⁶ mol/L	0.03 μg/mL			
		BSA, 0.06~10 × 10 ⁻⁶ mol/L	0.02 μg/mL			
		pH 4.4 NaAc-HAc				
		1.6 × 10 ⁻⁴ mol/L PtCl ₆ ²⁻	HSA 2~30 μg/mL			
	1.2 × 10 ⁻⁴ mol/L Br ⁻	HSA 0.8~5.2 μg/mL		人血清	[75]	
	6.0 × 10 ⁻⁵ mol/L I ⁻	HSA 0.8~4.0 μg/mL				
银		0.456~9.12 μg/mL			[21]	
红细胞		0.015~31.1 × 10 ⁶ 个/mol			[69]	
砷	0.12 mol/L H ₂ SO ₄	1~20 ng/mL		铅锌矿	[66]	
	1.0 × 10 ⁻³ mol/L Na ₂ MoO ₄					
	1.0 × 10 ⁻⁵ mol/L RDB					
银	0.04 mol/L H ₂ SO ₄ -0.3% Triton-x	0.1~4.0 μg/mL	0.05 μg/mL	废水	[24]	

表 1 液相纳米微粒共振散射光谱研究及其分析应用(续)

Table 1 RSS of some nanoparticles in liquid phase and their analytical applications(continue)

测定物质	条件	测定范围	检出限	样品	文献
钼		$1.0 \times 10^{-5} \sim 3.0 \times 10^{-4}$ mol/L			[15]
Si	0.04 mol/L H ₂ SO ₄				
	3.0×10^{-5} mol/L 酒石酸锶钾				
	1.0×10^{-3} mol/L Na ₂ MoO ₄	2~ 40 ng/mL	1 ng/mL	钢	[104]
	1.0×10^{-5} mol/L RDB				
小檗碱	pH 4.0 HAe-NaAc				
	2.5×10^{-5} mol/L TPB	0.06~ 5.28 μg/mL	26 ng/mL		[62]
	pH 4.8 NaNO ₃ -HNO ₃				
	0.2×10^{-5} mol/L 苯磺酸钠	0.35~ 4.4×10^{-4} mol/L		复方黄片 剂针剂	[105]
黄酮	pH 4.0 HAe NaAc	0.6~ 2.4 mg/L	0.3 mg/L	舒血宁	[103]
	2.0×10^{-4} mol/L Na ₂ MoO ₄				

光光谱宽,且连续分布,而发射光谱呈对称分布且宽度窄,颜色可调,即不同大小的纳米微粒能被单一波长的光激发而发出不同颜色的光,并且光化学稳定性高,不易光解^[109]。林章碧等人综述了3种纳米微粒可作为荧光标记:具有光学活性的金属纳米微粒;如金纳米微粒标记DNA,可以检测超痕量的DNA(10 fmol)。荧光纳米球乳液,如Taylor等^[120]用纳米球标记蛋白质来测定拉直到单个DNA分子的特定序列^[120]。发光量子点^[111],如可单一波长光源同时激发不同大小的量子点(激发光谱为连续分布),使它们发射出不同颜色的光同时被检测且持续发光(在某种情况下其发光时间可达到染料分子的108倍)。Fernando等^[121]报道的自组装CdSe-ZnS量子点用于生物标记,制备了具有生物活性的、高荧光产率的蛋白质修饰的CdSe-ZnS量子点可以用来免疫、生化等分析方面;CdSe/ZnS(core-shell)的量子点生物标记检测DNA碱基序列的报道^[122]。在免疫分析方面,有Trau等^[123]制备了纳米包裹的荧光素二乙酸酯(FDA)微晶,能放大70~2000倍标记的鼠MlgG的检测,检测范围取决于分析浓度和稀释的倍数如大于1200倍时,为1~30 ng/mL,与酶标记的免疫检测不一样,它不需要长时间的培养。Grubisha等人^[124]用30 nm的金纳米微粒标记的前列腺抗原(PSA)来分析检测单无性抗体表面拉曼散射增强法,人血清的检测限为1 pg/mL,牛血清的检测限为4 pg/mL。Hirsch等^[125]用金纳米球全血免疫分析的报道。最近研究发现的液相银纳米微粒的界面荧光在某些方面比量子点的还要好,如激发波长要求更

低,既有常规的发光现象,还有光子反转发光现象等。

参考文献:

- [1] 黄锐,王旭,李忠明. 纳米塑料 聚合物/纳米无机物复合材料研制、应用与进展[M]. 北京:中国轻工业出版社,2002.
- [2] 王永康,王立. 纳米材料与技术[M]. 杭州:浙江大学出版社,2003. 847.
- [3] Hagfeldt A, Gratzel M. Light-induced redox reactions in nanocrystalline systems[J]. J Chem Rev, 1995, 95: 49-68.
- [4] 姚保利,侯洵. 纳米光生物分子材料菌紫质及其在信息科学中的应用[J]. 自然杂志, 2000, 22(5): 253-258.
- [5] 张海林,刘韩星,欧阳世翕. 微波技术在无机化合物合成中的应用[J]. 材料导报, 1996, 4: 44-46.
- [6] Alivisatos A P. Semiconductor cluster, nanocrystals, and quantum dots[J]. Science, 1996, 271: 933-937.
- [7] Zhao X K, Yang J, Mccormick L D, et al. Epitaxial formation of PbS crystals under anachidic acid monolayers[J]. J Phys Chem, 1992, 96: 9 933-9 939.
- [8] Zarur A J, Ying J Y. Reverse microemulsion synthesis of nanostructured complex oxide for catalytic combustion[J]. Nature, 2000, 403: 65-67.
- [9] Osakada K, Taniguchi A, Kubota E, et al. New organosols of CuS, CdS, ZnS, NiS, and mixed metal sulfides in N,N-dimethylformamide and dimethyl sulfoxide preparation, characterization, and physical properties[J]. J Chem Mater. 1992, 4: 562-570.
- [10] Koitan A R, Hull R, Opila R L, et al. Nucleation and Growth of CdS on ZnS quantum crystallite seeds, and vice

- versa in Inverse micelle media [J]. J Am Chem Soc, 1990, 112: 1 327-1 332.
- [11] Cheng G X, Shen F, Yang L H, *et al.* On properties and structure of the AOT-water-isooctane reverse micellar microreactor for nanoparticles [J]. Mater Chem Phys, 1998, 56: 97-101.
- [12] Motte L, Billoudet F, Lacaze E, *et al.* Self-organization of size selected nanoparticles into three-dimensional superlattices [J]. Adv Mater, 1996, 8(12): 1 018-1 020.
- [13] Yamaguchi Y, Aoki R, Azemar N, *et al.* Phase behavior of cationic microemulsions near the tricritical point [J]. Langmuir, 1999, 15: 7 438-1 7 445.
- [14] Curi M L, Agostiano A, Manna L, *et al.* Synthesis and characterization of CdS nanoclusters in a quaternary microemulsion the role of the cosurfactant [J]. J Phys Chem B, 2000, 104: 8 391-8 397.
- [15] 刘庆业, 蒋治良, 蒙冕武. 钼纳米微粒的微波高压液相合成及共振散射光谱研究 [J]. 分析测试技术与仪器, 2001, 7(4): 199-203.
- [16] Jiang Z L, Feng Z W. Microwave Synthesis of gold nanoparticles with alcohol and its resonance scattering properties [J]. Chinese Chemical Letters, 2001, 12: 556.
- [17] Jiang Z L, Lin X M, Jiang Y M. Microwave synthesis of TiO₂ nanoparticles and its resonance scattering properties [J]. Chemical Journal on Internet, 2001, 4(2): 017n.
- [18] 覃爱苗, 蒋治良, 刘庆业, 等. 聚丙烯酰胺存在下微波高压合成银纳米粒子及光谱特性研究 [J]. 分析化学, 2002, 30: 1 254.
- [19] 蒋治良, 钟福新, 李廷盛, 等. 绿色银纳米粒子的共振散射光谱研究 [J]. 化学学报, 2001, 59: 538.
- [20] 钟福新, 蒋治良, 梁宏. 黄色和绿色银纳米粒子的光化学合成及共振散射光谱研究 [J]. 感光科学与光化学, 2001, 20(1): 17.
- [21] 钟福新, 蒋治良, 李芳, 等. 银纳米粒子的光化学制备及共振散射光谱研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2000, 20(5): 724.
- [22] 凌绍明, 蒋治良, 闭献树, 等. (AgCl)_n核-(Ag)_n壳复合纳米粒子的光化学合成及共振散射光谱研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2001, 21(6): 866.
- [23] 王柳萍, 蒋治良. 银(I)-二苯羟乙酸光反应体系的共振散射光谱研究 [J]. 分析测试技术与仪器, 2000, 6(1): 25-28.
- [24] 蒋治良, 杨明媚, 莫琪. 微量银的光化学共振散射光谱分析 [J]. 贵金属, 2000, 21(3): 24.
- [25] Troupis A, Hiskia A, Papaconstantinou E. Synthesis of metal nanoparticles by using polyoxometalates as photocatalysts and stabilizers [J]. J Angew Chim IntEd, 2002, 41: 1 911.
- [26] 廖凯荣, 卢泽俭, 郑臣谋, 等. 聚乳酸/羟基磷灰石复合材料的研制 I. 超细微羟基磷灰石的合成及表面处理 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 1999, 38(3): 43-47.
- [27] Burnside S, Moser J E, Brooks K, *et al.* Nanocrystalline mesoporous strontium titanate as photoelectrode material for photosensitized solar devices: Increasing photovoltage through flat band potential engineering [J]. J Phys Chem B, 1999, 103: 9 328-9 332.
- [28] 魏雨, 刘晓林, 郑学忠. 均分散超 α -Fe₂O₃水溶胶东制备 [J]. 物理化学学报, 1996, 12(6): 551-553.
- [29] 陈宗其, 王光信, 腾弘霓. 均分散体系及其应用 [J]. 化学通报, 1990, 1: 23-26.
- [30] Poggi M A, Bottomley L A, Lillehei P T. Scanning probe microscopy [J]. J Anal Chem, 2002, 74(12): 2 851-2 862.
- [31] 黄惠忠. 表面分析仪器和技术进展 [J]. 国外分析仪器技术与应用, 1998, 1: 9-26.
- [32] 梅燕, 梁惠峰, 胡章记. 用电镜及 XRD 衍射仪表征不同晶型的纳米 TiO₂粉末 [J]. 现代仪器, 2002, 4: 25-26.
- [33] 王柯敏, 谭蔚泓, 白春礼. 近光场学纳米技术及其应用 [J]. 化学通报, 1995, 7: 22-26.
- [34] 蒋治良. 纳米微子与共振散射光谱学 [M]. 桂林: 广西师范大学出版社, 2003.
- [35] 蒋治良. 液相金纳米粒子非线性光散射方程的研究 [J]. 分析测试技术与仪器, 2000, 6(4): 200.
- [36] Jiang Z J, Liu S P, Chen S. A study of the resonance nonlinear scattering and pumps effect of silver atomic clusters [J]. Spectrochimica Acta, Part A, 2002, 58: 3 121.
- [37] Creighton J A, Eadond G. Ultraviolet-visible absorption spectra of the colloidal elements [J]. J Chem Soc Faraday Trans, 1991, 87(24): 3 881-1 3 899.
- [38] 马国宏, 杜祖亮, 赵伟利. ZnS 超微粒有序组装体系制备与结构研究 [J]. 化学物理学报, 1998, 11(3): 252-255.
- [39] Henglein A. Small-particle research: physicochemical properties of extremely small colloidal metal and semiconductor particles [J]. J Chem Rev, 1989, 89: 1 861.
- [40] 何声太, 姚建年, 汪裕平, 等. 银纳米粒子自组装二维有序阵列 [J]. 物理学报, 2001, 50(4): 765-769.
- [41] 贺蓉, 钱雪峰, 印杰, 等. 王海林. 银纳米棱镜的形成及其光学性能研究 [J]. 高等学校化学学报, 2003, 24(8): 1 341-1 345.
- [42] Woggon W, Gapponenko S. Homogeneous linewidth of confined electron-hole pair states In II, VI quantum dots [J]. J Phy Rev, 1993, B47: 3 684.

- [43] Woris D J, Socra A, Gbawend G. Measurement of the size dependent hole spectrum in CdSe quantum dots[J], *Phys Rev Lett*, 1994, 72: 2 612.
- [44] 史守华, 孙兆奇, 孙大明. Ag-MgF₂复合纳米金属陶瓷薄膜的微结构及吸收光谱特性研究[J], *光子学学报*, 2002, 22(5): 621-626.
- [45] Rivas L, Cortes S S, Garcia J V, *et al.* Growth of silver colloidal particles obtained by citrate reduction to increase the Raman enhancement factor[J]. *Langmuir*, 2001, 17(3): 574-577.
- [46] 徐云峰, 汤傲, 姚建林, 等. 有序银纳米线阵列的表面增强拉曼光谱研究[J], *光散射学报*, 2002, 13(4): 216-219.
- [47] 司民真, 武荣国, 张鹏翔. pH 对异烟酸在正、负电性纳米银上的吸附影响[J]. *楚雄师范学院学报*, 2002, 17(6): 33-34.
- [48] 司民真, 武荣国, 张鹏翔. PNL 分子在正、负电性纳米银上的吸附取向[J]. *光子学报*, 2002, 30(8): 1 016-1 018.
- [49] 郑军伟, 李晓伟, 周耀国, 等. 二维组装纳米银粒子上对巯基苯胺的表面增强拉曼光谱研究[J]. *光散射学报*, 2003, 14(4): 201-204.
- [50] 郑军伟, 周群, 丁红. 吸附色素蛋白与纳米银粒子间的光诱导电子传递[J]. *高等学校化学学报*, 2003, 24(3): 419-421.
- [51] Herne T N, Ahem A M, Garrell R L. Surface-enhanced Raman spectroscopy of tri-peptides and protein absorption colloidal silver[J]. *Analytica Chimica Acta*, 1991, 246(1): 75-84.
- [52] Garrell R L. Surface-enhanced Raman spectroscopy[J], *J Anal Chem*, 1989, 61(6): 401A-420A.
- [53] Glarrel R L. Surface-enhanced Raman spectroscopy[J], *J Anal Chem*, 1989, 61: 401R-18R.
- [54] Pastnack R F, Collings P J. Resonance light scattering: a new technique for studying chromophore aggregation[J]. *J Am Chem Soc*, 1993, 115: 5 393-5 399.
- [55] Liu S P, Feng P. Resonance rayleigh scattering for the determination of berberine in table form with some acidic xanthene fluorescent dyes[J]. *Mikrochim Acta*, 2002, 140(1): 189-193.
- [56] Liu s P, Zhang Z Y, Liu Q, *et al.* Spectrophotometric determination of vitamin B₁ in a pharmaceutical formulation using triphenylmethane acid dyes[J]. *J Pham Biomed Anal*, 2002, 30(3): 685-694.
- [57] Li N B, Liu S P, Luo H Q. Frequency doubling scattering and second order scattering technology as novel methods for the determination of the inclusion constant of β -cyclodextrin[J]. *Anal Chim Acta*, 2002, 472: 89\ 198.
- [58] Huang C Z, Li K A, Tong S Y. Determination of nucleic acids by a resonance light-scattering technique with α , β , γ , δ -tetrakis-[4-(trimethylammoniumyl) phenyl] porphine[J]. *Anal Chem*, 1996, 68(13): 2 259-2 260.
- [59] Huang C Z, Li K A, Tong S Y. A resonance light-scattering analysis of the suprahelical helixes of nucleic acids induced by 5, 10, 15, 20-tetrakis [4-(trimethylammonio)-phenyl] porphine[J]. *Bull Chem Soc Jpn*, 1997, 70: 1 843-1 849.
- [60] Huang C Z, Li K A, Tong S Y. Determination of nucleic acids in nanogram by their enhancement effect on the resonance light-scattering of cobalt (II) /4-[(5-chloro-2-pyridyl) azo]-1,3-diaminobenzene complex[J], *Anal Chem*, 1997, 69(3): 514-520.
- [61] Huang C Z, Zhu J X, Li K A, Tong S Y. Microdetermination of proteins by resonance light-scattering technique using meso-tetrakis (4-sulfonatophenyl) porphyrin[J]. *Anal Sci*, 1997, 13: 263-268.
- [62] 邹节明, 江洪流, 王力生, 等. 小檗碱-四苯硼钠缔合纳米微粒体系的共振瑞利散射光谱及其分析应用[J]. *药学报*, 2003, 38: 530.
- [63] Jiang Z J, Liu S P, Liu P Q. Catalytic reaction resonance scattering spectral method for the determination of trace amounts of Se[J]. *Talanta*, 2002, 58: 635.
- [64] Jiang Z L, Peng Z L, Lius P. Resonance scattering spectral determination of HSA with a new scattering enhanced reagent of K₃[Fe(CN)₆][J]. *Chem J China*, 2002, 20: 1 566.
- [65] 蒋治良, 冯忠伟, 李芳, 等. 金纳米粒子的共振散射光谱[J]. *中国科学(B 辑)*, 2001, 31(2): 183.
- [66] 黄炎炎, 蒋治良. 砷钼杂多酸-罗丹明 B 三元离子缔合物的二级散射光谱研究[J]. *分析科学学报*, 2000, 16(2): 546.
- [67] Jiang Z L, Liu Q Y, Liu S P. Resonance scattering spectral analysis of chlorides based on the formation of (AgCl)_n(Ag)_s nanoparticle and its nonlinear resonance scattering study[J]. *Spectrochimica Acta Part A*, 2002, 58: 2 759.
- [68] 翟好英, 蒋治良, 章表明. 液相卤化银纳米微粒体系的荧光和共振散射光谱特性[J]. *化学学报*, 2004, 62: 1 272.
- [69] 杨明媚, 蒋治良. 兔红细胞的共振散射光谱研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2002, 22(2): 180.
- [70] 王力生, 蒋治良, 刘绍璞. 色氨酸的非线性变频荧光研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2002, 22(4): 641.
- [71] 谢济运, 蒋治良. 溃疡病菌的共振散射光谱研究[J]. *物理化学学报*, 2001, 20(5): 356.

- [72] 蒋治良, 冯忠伟, 蒋毅民. 金纳米粒子的非线性共振散射及光强度函数研究[J]. 无机化学学报, 2001, 26(2): 355.
- [73] 谢剂运, 蒋治良. 血细胞的光谱特性研究[J]. 分析测试技术与仪器, 2000, 6(3): 256.
- [74] 廖祖荷, 罗杨合, 蒋治良, 等. 大肠杆菌的共振散射光谱研究[J]. 分析测试技术与仪器, 2003, 9(2): 65-69.
- [75] 翟好英, 蒋治良, 章表明. 卤铂酸-人血清白蛋白体系的瑞利散射光谱研究及分析应用[J]. 贵金属, 2004, 25(2): 5.
- [76] 刘绍璞, 蒋治良, 孔玲. $[HgX_2]_n$ 纳米微粒的吸收光谱、Rayleigh 散射和共振 Rayleigh 散射光谱研究[J]. 中国科学(B 辑), 2002, 32(6): 614.
- [77] 梁宏, 沈星灿, 蒋治良. HSA 与 Γ 相互作用的共振瑞利散射光谱研究[J]. 中国科学(B 辑), 2000, 30(5): 650.
- [78] 蒋治良, 李芳, 梁宏. 磷钼杂多酸-罗丹明 S 体系的共振散射光谱研究[J]. 化学学报, 2000, 58: 1059.
- [79] 蒋治良, 李芳, 梁宏. 金纳米粒子的粒径与共振散射光强度的关系[J]. 高等学校化学学报, 2000, 21(10): 1488.
- [80] 蒋治良, 刘绍璞, 王力生. 金纳米粒子-荧光素体系的光谱特性[J]. 高等学校化学学报, 2003, 24: 1201.
- [81] 罗杨合, 蒋治良. 碘金酸-阳离子表面活性剂缔合微粒体系的吸收光谱研究及分析应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2004, 24.
- [82] 彭忠利, 蒋治良. α -DNA 的共振散射光谱研究[J]. 分析化学, 2002, 30(11): 1534.
- [83] 蒋治良, 邹节明, 王力生. 蛋白质与三氯乙酸相互作用的共振散射光谱研究及分析应用[J]. 分析化学, 2003, 31(1): 70.
- [84] 蒋治良, 蒙冕武, 刘绍璞. 硫化镉纳米微粒的共振瑞利散射光谱研究[J]. 分析化学, 2003, 31(5): 315.
- [85] 蒋治良, 刘凤志, 刘绍璞. 氯金酸-罗丹明 S 缔合纳米微粒体系的共振散射与荧光猝灭[J]. 分析化学, 2003, 31(11): 1364.
- [86] 蒋治良, 刘绍璞, 陈颀. Fe_2O_3 纳米粒子的共振散射光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2002, 22(4): 615.
- [87] 蒋治良. 金纳米粒子的分频共振散射光谱研究[J]. 光子学报, 2001, 30(4): 460.
- [88] 蒋治良, 刘绍璞, 刘庆业. 碳纳米粒子的共振散射光谱研究[J]. 应用化学, 2002, 19(1): 22.
- [89] 梁爱惠, 蒋治良, 覃爱苗. 钼杂多酸与蛋白质相互作用的共振散射光谱研究[J]. 应用化学, 2002, 19(8): 768.
- [90] 蒋治良, 刘绍璞. 关于 $(Au_{14}RDG)_n$ 缔合物纳米微粒体系的共振散射增强与荧光猝灭[J]. 应用化学, 2002, 19: 1133.
- [91] 蒋治良, 江洪流, 刘凤志. 染料分子吸收对硫纳米微粒瑞利散射光谱的影响[J]. 应用化学, 2003, 20(4): 351.
- [92] 刘绍璞, 刘忠芳, 蒋治良. $[CdL_4]^{2-}$ -罗丹明染料体系的共振瑞利散射光谱研究. 化学学报, 2001, 59(11): 1243.
- [93] 蒋治良, 刘绍璞, 陈颀. 银原子团簇的共振散射光谱研究[J]. 贵金属, 2001, 22(2): 4.
- [94] 蒋治良, 李芳, 梁宏. $Ag-CV$ 表面增强共振散射光谱研究[J]. 分析测试技术与仪器, 2000, 6(2): 98.
- [95] 邹彩霞, 蒋治良, 尹文清. 四苯硼钠-甲苯胺蓝缔合物纳米微粒体系减色效应研究[J]. 分析测试技术与仪器, 2002, 8(2): 81-84.
- [96] 李芳, 蒋治良. $[Pt_6-2RDG]_n$ 缔合物纳米微粒体系的共振散射、荧光猝灭和减色效应研究[J]. 分析测试技术与仪器, 2002, 8(3): 147-152.
- [97] Jiang Zhiliang, Pan Hongcheng, Yuan Weien. The change color effect and spectral properties of gold nanoparticle-cationic surfactants system[J]. Chemical Journal in Chinese Universities, 2004, 20(5): 523.
- [98] Zou JM, Jiang Z L, Wang L S, *et al.* Spectral properties of the association nanoparticle system of ciprofloxacin-phloxine and its application to fluorescence analysis[J]. Anal Sci, 2004, 20(6): 957.
- [99] 蒋治良, 罗杨合, 刘凤志, 等. 灰白黑纳米微粒铁酸钡的共振散射光谱研究[J]. 广西师范大学学报, 2003, 21: 52-59.
- [100] 蒋治良, 刘绍璞, 陈颀. 硝化纤维素-甘油-丙酮-苯纳米微粒体系的光谱特性研究[J]. 西南师范大学学报, 2002, 27: 355-360.
- [101] 陈颀, 蒋治良, 刘绍璞. 二氧化锰纳米微粒的制备及其共振瑞利散射光谱研究[J]. 西南师范大学学报, 2002, 27: 73-77.
- [102] 潘宏程, 蒋治良, 袁伟恩. 铬天青 S-铝(III)-聚乙二醇 4000 体系的共振散射光谱研究及其分析应用[J]. 环境化学, 2004, 24(5): 573.
- [103] 邹节明, 袁伟恩, 蒋治良, 等. 舒血宁中总黄酮的共振散射光谱分析[J]. 中草药, 2003, 34(11): 987.
- [104] 邓晔, 曾建强, 李芳, 等. 硅钼杂多酸-罗丹明 B 缔合物的共振散射光谱研究及分析应用[J]. 分析测试技术与仪器, 2000, 6(2): 86-88.
- [105] 邹节明, 潘宏程, 蒋治良, 等. 盐酸小檗碱-十二烷基苯磺酸钠缔合微粒体系的共振散射光谱研究及分析应用[J]. 分析化学, 2003, 31(12): 1348.
- [106] 陈国珍. 荧光分析法[M]. 北京: 科学出版社.
- [107] 梁宏, 邢本刚, 吴庆轩. $Cu(II)$, $Fe(III)$ 与人血清白蛋白相互作用的荧光光谱研究[J]. 化学学报, 1999, 57:

- 161-165.
- [108] 徐岩, 黄汉国, 沈含熙. 喹诺酮类药物对人血清白蛋白的荧光猝灭研究 [J]. 分析化学, 1998, 26(12): 1 494-1 497.
- [109] Taylor J R, Fang M M, Nie S M. Probing Specific Sequences on Single DNA Molecules with Bioconjugated Fluorescent Nanoparticles [J]. Anal Chem, 2000, 72: 1 979-1 986.
- [110] Chan W C, Nie S M. Quantum Dot bioconjugates for ultrasensitive detection nonsitopic [J]. Science, 1998, 281: 2 016.
- [111] Rossetti R, Nakahara S, Brus L E. Quantum size effects in the redox potentials resonance Raman spectra and electronic spectra of Cd Crystallites in aqueous solution [J]. Chem Phys, 1983, 79: 1 086.
- [112] 李贵安. 染料包覆纳米银粒子复合膜的荧光猝灭效应 [J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2000, 28(4): 45-47.
- [113] 杨建军, 赵清岚, 周静芳, 等. 表面修饰 Ag₂S 纳米微粒的制备及其量子尺寸效应研究 [J]. 化学研究, 1998, 9(4): 36.
- [114] Stephan H, Olaf L, Makus H. Ulrich, Blue, Green, and Red upconversion emission from lanthanide-doped LuPO₄ and YbPO₄ nanocrystals in a transparent colloidal solution [J]. Angew Chem, 2003, 42: 3 179-3 182.
- [115] Sungjee K, Brent F, Hans - jgen E, *et al.* Type-II quantum dots: CdFe/CdSe (Core/ Shell) and CdSe/ZnFe (Core/Shell) heterostructures [J]. J Am Chem Soc, 2003, 125: 11 466-11 467.
- [116] Karsten K, Holger B, S J rg, *et al.* Green-emitting CePO₄ Core shell nanoparticles with 70% photoluminescence quantum yield [J]. Angew Chem, 2003, 42: 5 513-5 516.
- [117] Patra A, Friend C S, Kapoor R, *et al.* Upconversion in Er³⁺: ZrO₂ nanocrystals [J]. J Phys Chem B, 2002, 106: 1 909-1 912.
- [118] Huang C Z, Li Y F. Resonance light scattering technique used for biochemical and pharmaceutical analysis [J]. Anal Chim Acta, 2003, 500, 105-117.
- [119] 马春琪, 刘英, 李克安. 瑞利光散射及其在生物化学分析中的应用研究 [J]. 科学通报, 1999, 44(7): 682.
- [120] Taylor J R, Fang M M, Nie S M, Probing specific sequences on single DNA molecules with bioconjugated fluorescent nanoparticles [J]. J Anal Chem, 2000, 72: 1 979-1 986.
- [121] Fernando P, Ron G, Yossi W, *et al.* L₁ tamar, Lighting-up the dynamics of telomerization and replication by CdSe-ZnS quantum dots [J], J Am Chem Soc, 2003, 125: 13 918-13 919.
- [122] Dabbous B O, Viesio J R, Mikulec F V, *et al.* (CdSe) ZnS core- shell quantum dots: synthesis and characterization of a size series of highly luminescent nanocrystallites [J]. J Phy Chem B, 1997, 101: 9 463-9 475.
- [123] Trau D, Yang W J, Caruso S M, *et al.* Nanoencapsulated microcrystalline particles for superamplified biochemical assays [J]. Anal Chem, 2002, 74: 5 480-5 486.
- [124] Grubisha D S, Lipert R J, Park H Y, *et al.* Femtomolar detection of prostate-specific antigen: an immunoassay based on surface-enhanced Raman scattering and immunogold [J]. Anal Chem, 2003, 75: 5 936-5 943.
- [125] Hirsch L R, Jackson J B, Lee A, *et al.* A Whole blood immunoassay using gold nanoshells [J]. Anal Chem, 2003, 75: 2 377-2 381.

Spectral Properties of Some Nanoparticles in Liquid Phase and their Analytical Applications

YUAN Wei-en, JIANG Zhi-liang

(Institute of Material Science and Engineering, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

Abstract: The absorption, fluorescence and resonance scattering spectral properties of some nanoparticles in liquid phase, and their applications to resonance scattering spectral analyses were reviewed. Reference of 125 papers was cited.

Key words: nanoparticles in liquid phase; spectral properties; resonance scattering effect

Classifying number: O657. 33

动 态

网上仪器展览全面改版

由中国分析测试协会主办、中国仪器仪表学会分析仪器学会协办、仪器信息网(www.instrument.com.cn)承办的网上仪器展览(www.netshow.com.cn)平台自2001年9月开通以来,受到广大业界人士的关注和欢迎,大家足不出户,即可查到所需仪器产品和厂商的详细资料,并可对同类产品不同型号的仪器进行比较。目前,已有近300家国内外著名仪器厂商参展,展出仪器1800多台(含图片和详细文字介绍),发布各类仪器应用文章1400多篇。

为使网上仪器展览真正成为广大仪器采购者身边的选型采购手册,根据多位用户的建议,网上仪器展览近期将做全面改版。

将新增以下栏目:

- 1、“本网推荐仪器”:将把一批有多位用户推荐的较稳定的仪器产品、或是正在搞促销的产品,以及获过奖的仪器产品及时推荐给用户。
- 2、“二手仪器”:为促进二手闲置仪器的流通而设置,大家可免费发布二手仪器的供求信息。
- 3、“展商动态”:仪器厂商最新的产品动态、培训讲座、迁址等信息。
- 4、“下载中心”:仪器厂商的仪器样本、用户通讯、报价单等文件可在此直接下载获取。
- 5、“报价中心”:将收录仪器常用零配件、耗材及试剂的最新产品信息。

欢迎大家访问: www.netshow.com.cn

(仪器信息网 www.instrument.com.cn 供稿)

2004- 7- 15