

生物医用量子点材料的研究进展*

胡 朗,王德平,姚爱华,黄文

(同济大学材料科学与工程学院,上海 200092)

摘要 量子点是一种新型的荧光材料,由于独特的微观结构和物理、化学特性,使其在生物医学领域有广阔的应用前景。通过对近十多年来,有关含重金属的量子点制备技术、应用实例等的现状分析,提出了合成新颖的无重金属量子点即低毒性或生物兼容性量子点的重要意义和迫切性,介绍了合成低毒性或生物兼容性量子点的最新研究现状,并展望了今后的发展前景。

关键词 低毒性或生物兼容性量子点 制备 应用

Progress in Study of Biomedical Quantum Dots

HU Lang, WANG Deping, YAO Aihua, HUANG Wenchan

(School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract Quantum dots (QDs), with unique microstructure and physical chemistry properties, is a kind of new fluorescent materials. It has extensive application future in biomedical field. Through analysing synthesis technologies and applied examples of heavy-metal QDs, the key implication and urgency of non heavy-metal QDs, lowly toxic and highly biocompatible quantum dots, are proposed. The recent progresses in synthesis and future development perspectives of non heavy-metal QDs are also presented.

Key words lowly toxic and highly biocompatible QDs, synthesis, applications

0 引言

量子点(QDs)是指半径小于或接近激子波尔半径的半导体纳米晶,又被称为“人造原子”。当颗粒尺寸接近或者小于激子波尔半径时,由于量子限域效应,其原有的连续能带结构发生分立、量子化,从而使其光学、物理和化学性能都发生显著变化。与传统的块体材料相比,量子点具有一系列优异的性能,如受光照射能激发出可见荧光,其激发光谱连续、发射光高度对称且狭窄、荧光峰位置可随量子点的物理尺寸和化学成分进行调控,因而有望取代有机染色剂而在生物荧光成像、生物大分子识别及其检测等方面得到广泛的应用^[1]。当前,量子点可作为荧光标记物示踪观察活细胞或组织的结构与活动乃至进行动物活体成像^[2],量子点用于追踪药物颗粒在体内的走向和作用^[3]等已被大量报道。此外,量子点在肿瘤细胞及癌症诊断影像^[4]、DNA/RNA、激素、毒素、生物因子等生物大分子的识别与检测^[5],以及在荧光共振能量转移^[6]等方面的应用也越来越受到重视。

但是,这些被报道的量子点材料大多都是采用胶体化学方法在有机体系中合成,即用金属有机化合物在具有配位性质的有机溶剂环境中生长的纳米晶粒。这些纳米晶粒由于缺乏水溶性,因而不能直接用于生物医学上,需要对其表面进行复杂的改性和修饰。这不仅使其荧光性能显著降低,而且修饰剂不稳定,容易脱落^[7]。此外,合成的量子点组成主

要是镉的氧族元素二元化合物 CdE (E = S、Se、Te) 及其核壳结构(如 CdSe/ZnS 核壳量子点)^[8,9]。Cd 是一种有剧毒的重金属元素,含 Cd 量子点在生物标记过程中容易释放 Cd²⁺ 而损伤生物体。

针对含重金属量子点所存在的一系列问题,应积极开展低毒性或生物兼容性量子点材料的制备、结构和性能的研究^[10,11]。低毒性或生物兼容性量子点具有不含重金属而且合成方法简单、条件温和、环境污染程度低等特点,因而必将成为未来量子点材料的发展方向。本文拟通过综述近期有关量子点材料的研究现状,在阐述发展低毒性或生物兼容性量子点材料的重要意义及其在生物医学领域中的应用前景的同时,提出当前解决低毒性或生物兼容性量子点存在问题的关键制备技术。

1 含镉量子点的研究现状

早期含镉量子点通常采用胶体化学方法在有机体系中合成。Murray 等^[12]用二甲基镉和三辛基硒化磷作前驱体,将其依次注入剧烈搅拌的 350 的三辛基氧化膦 (Trioctylphosphine oxide, TOPO) 溶液中,合成了高荧光产率的 CdSe 量子点,并采用尺寸选择沉淀法得到了单分散的 CdSe 量子点。但是这样的量子点容易受杂质和晶格缺陷的影响,荧光量子产率很低。Hines 等^[7]报道合成了核壳结构的 CdSe/ZnS 量子点,利用纳米粒子的有效限域载流子效应使

*上海科委纳米专项基金(0852nm05200);国家自然科学基金(50572072)

胡朗:男,1986年生,硕士研究生

其室温荧光量子产率达到了 50%。但这些工作中使用的原料仍然为剧毒、易燃、昂贵和室温不稳定的二甲基镉,且当注入热的 TOPO 后,溶液中可能出现金属沉淀。为此,近年来人们已经开始采用无毒、稳定且价廉的共溶剂替代传统的 TOPO 等。如 Yu Feng Liao 等^[13]用石蜡共溶剂替代 TOPO,以油酸为反应介质合成了荧光性能较好的 CdSe 量子点。

然而,即便如此,这些在有机相中合成的量子点与生物环境总还有较多的不相容之处,不能直接应用于生物体系。为了提高这些有机相中制备的量子点的生物相容性,当前研究比较多的是直接对有机相中制备的量子点进行表面修饰。如 Nie 等^[7]利用巯基与 Zn 原子之间的配位作用实现了 CdSe/ZnS 量子点表面与巯基乙酸(TGA)的连接,由于量子点表面的非极性分子被极性基团取代,因而有利于量子点与各种生物分子(如蛋白质、肽、核酸等)共价连接,有效提高了有机相中获得的量子点的生物相容性。此外,Libchaber 等^[14]还采用两性分子中憎水基团与量子点表面憎水基团相互作用交联的方法,来提高油相量子点的水溶性。但是这些方法的不足之处是容易使体系出现絮凝、荧光量子产率下降或制备技术复杂、费用昂贵等。为了改善量子点的水溶性,还可以用 SiO₂ 包覆量子点。如 Kun Han 等^[15]用溶胶-凝胶法合成了 SiO₂ 包覆的 CdTe 量子点。由于 SiO₂ 钝化了 CdTe 量子点表面缺陷,与水溶液中的单个 CdTe 量子点相比,被 SiO₂ 包覆的 CdTe 量子点的稳定性得到了明显提高。又如 Selvan 等^[16]用反相微乳液法合成了稳定性好且荧光效率较高(17%~20%)的 SiO₂/ZnS-CdTe 和 SiO₂/CdSe,并与 MAA-CdSe 和 PA/ZnS-CdSe 进行细胞毒性的比较。结果发现, SiO₂ 包覆量子点对 Cos7、IH3T3 和 Hep G2 3 种细胞的毒性远小于同等条件下 MAA/CdSe 和 PA/ZnS-CdSe 的细胞毒性。他们认为毒性降低的主要原因是 SiO₂ 包覆有效抑制了 CdSe 降解。但 SiO₂ 包覆量子点的工艺仍然比较复杂,且容易使荧光效率明显下降。此外, SiO₂ 表面存在许多小孔还可能致量子点中有毒成分因氧化分解而泄漏。

除了应用量子点的包覆技术改善其性能外,当前还出现了许多有关直接在水相中合成量子点以改善其水溶性的研究报道^[17,18]。直接在水相中合成量子点的方法主要有水相沉淀法、微波辐射辅助法、电化学沉淀法和光化学法等。这些方法因具有操作简单、重复性高、成本低、表面电荷和表面性质可控、很容易引入各种官能团分子等特点而成为当前研究的热点。Rogach 等^[7]报道采用水相法合成的巯基乙醇和硫甘油包覆的 CdTe 量子点有较高发光效率。Rui Yang 等^[19]报道采用水热法,在 100℃ 合成了三肽巯基谷胱甘肽稳定的 CdTe 量子点。王琰等^[8]用不同稳定剂(巯基乙酸(TGA)、巯基丙酸(MPA)、L-半胱氨酸(L-Cys)、3-巯基-1,2-丙二醇(TG))在水相中合成了 CdTe 量子点,并研究了不同合成条件对 CdTe 量子点光学性质的影响,结果表明, $n(\text{Cd})$ 、 $n(\text{Te})$ 、溶液 pH 值、回流时间以及稳定剂的性质对 CdTe 的光学性质有显著影响。

在水相合成量子点的过程中稳定剂对荧光性能有着重

要的作用,不同稳定剂使量子点有不同的表面结构,从而有不同的荧光效率。理想的稳定剂应该具有良好水溶性、与量子点结合能力强、生物相容性好且在后期使用中容易与生物大分子(蛋白质或抗体)偶联等特点。目前,人们使用较多的稳定剂多为水溶性巯基试剂,其特点是操作简单、价格低廉、毒性小,标记生物分子时不需要进行相转移,且对量子点表面性质影响较小等。根据文献报道,使用巯基试剂作稳定剂已经可以制备荧光稳定、几乎覆盖整个可见光范围(500~700nm)的量子点,如 CdTe、CdSe、CdS、CdS/ZnS、CdSe/ZnS、CdSe/CdS 等。常用的巯基类稳定剂有巯基乙醇、巯基羧酸、巯基乙酸、巯基丙酸、3-巯基-1,2-丙二醇、2-巯基乙胺、3-巯基丙酸^[7,8,19]。但是,最新的研究发现这些巯基试剂仍然存在着与量子点结合不稳定、易从其表面脱落而造成镉离子等重金属外析的危害^[7]。

2 发展低毒性或生物相容性量子点材料的重要性及其研究现状

由上述的分析讨论可知,有关含镉量子点的结构、性能和制备技术及其应用的研究已经取得了显著的进步,而且大量的探索性实验已经表明采用表面修饰技术或水相合成方法可以大大改善量子点的稳定性和安全性,但是依然不能完全消除量子点在使用过程中会分解出游离 Cd²⁺ 的可能性,含镉量子点的生物安全性仍然没有得到根本的解决。如 Guo 等^[20]分别用 Fuluronic68 (F-68)、溴代十六烷基三甲胺(CATB)和十二烷基磺酸钠(SDS)修饰 CdSe 量子点,并比较了这 3 种量子点对 Hep G2 细胞活性的影响。研究结果表明,修饰后的 3 种量子点的生物安全性都得到了不同程度的改善,但仍然存在不同程度的细胞毒性,其中经 F-68 修饰后的量子点的毒性小于经 CTAB 和 SDS 修饰后的毒性。Cho 等^[21]比较了 4 种表面经过不同修饰的量子点(MPA-CdTe、Cys-CdTe、NAC-CdTe 和 Cys-CdSe/ZnS)对人乳腺癌细胞增殖毒性的影响。实验结果表明,在 10μg/mL 质量浓度下暴露 1h, MPA-CdTe、Cys-CdTe、NAC-CdTe 均对人乳腺癌细胞存在着明显的毒性,而 Cys-CdSe/ZnS 尽管对人乳腺癌细胞活性几乎没有影响,但由于正常细胞的耐受性明显低于癌细胞,因而仍然发生了对正常细胞的伤害。基于这些研究,许多学者提出了开展合成无重金属量子点即绿色量子点研究及其应用的思路。目前,应用于生物荧光检测的低毒性或生物相容性量子点主要是 ZnS、ZnSe 和 ZnO 量子点。以下介绍这些年来有关绿色量子点的结构、性能和制备技术研究的新进展。

2.1 ZnS 量子点

根据能带结构的不同,量子点可以分为 2 类:窄禁带量子点如 CdSe(1.7eV)、CdTe(1.5eV)等;宽禁带量子点如 ZnS(3.6eV)、ZnSe(2.7eV)和 ZnO(3.4eV)。ZnS 是一种典型的 II-VI 族半导体,属于宽禁带半导体材料。早期主要是将 ZnS 外延生长在 CdSe 等量子点的表面,以构成一层或多层的宽禁带的无机材料,起到钝化内核表面缺陷的作用,从而提高其荧光效率。王德平等^[17]利用非均相成核原理,在水溶液中

合成了 CdSe/ZnS 量子点。研究结果表明,ZnS 壳层在 CdSe 核量子点表面外延生长所构成的 CdSe/ZnS 核壳结构量子点的荧光性能明显优于单一 CdSe 量子点。谢颖等^[22]用 L-半胱氨酸(Cys)作稳定剂,合成了水溶性的 CdSe/ZnS 量子点,吸收光谱和荧光光谱分析也表明 CdSe/ZnS 量子点比单一 CdSe 量子点有更优异的荧光特性。但是将 ZnS 单独作为量子点材料来研究的工作最早是由 Hui Li 等^[10,11]提出的,他所在的研究小组最早报道了用 3-巯基丙酸(MPA)作稳定剂在水相中合成 ZnS 量子点。此后,该小组又用 3-巯丙基三甲氧基硅烷(MPS)作稳定剂在类似的实验条件下合成 ZnS 量子点。与 3-巯基丙酸(MPA)包覆的量子点相比,MPS 包覆的量子点荧光量子产率更高,最大值可达 42%,其原因是 MPS 包覆的量子点表面有大量负电荷可以有效地阻止量子点团聚,而且与 MPA 相比,MPS 受光照时的稳定性更好,不容易从量子点表面脱落。他们进一步研究发现这种量子点具有很好的稳定性,在室温和实验室正常光线下,其荧光量子产率可以保持 50 天或更久不变。即便在去离子水或磷酸盐缓冲生理盐水内浸泡也有很好的稳定性,而且受紫外线照射长达 3h 不被氧化,显示了其在生物医学方面所具有的特殊作用。Li 等^[23]在水相中合成的半胱氨酸包覆的水溶性 ZnS 量子点作荧光探针研究了小牛胸腺 DNA 和鱼精 DNA 2 种核酸体系,此探针的检测精度相当高,对应的检出限分别为 32.9ng/mL 和 24.6ng/mL,显示出良好的应用前景。

2.2 ZnSe 量子点

ZnSe 量子点是一种宽禁带半导体材料,其禁带宽度为 2.7eV(460nm),能发射蓝色可见光。由于 ZnSe 量子点无毒,生物相容性好,因而也受到了研究者的重视。ZnSe 量子点可以在水相中直接合成,但其荧光量子产率不超过 1%,没有什么实用价值。为此,诸多的研究者先后采取了一系列的手段,如优化实验条件及光照后处理等方法来提高 ZnSe 量子点的荧光效率。Shave 等^[24]用 100W 的氙灯对水相中合成的、TGA 稳定的 ZnSe 量子点溶液进行光照处理,其荧光量子产率得到显著提高。此后,李舒艳等^[25]在 Shave 所做工作的基础上做了更加详细的研究,他们在水相中以巯基乙酸(TGA)为稳定剂,通过 Zn^{2+} 和 $NaHS$ 反应合成了 ZnSe 量子点。虽然新合成的 ZnSe 几乎无荧光,但是经过紫外线照射处理后呈现强的带边发射,显著提高了其荧光量子产率。究其原因是在紫外光可以诱导键合在 ZnSe 表面的 TGA 发生光解产生 S^{2-} ,并与溶液中过量的 Zn^{2+} 作用在 ZnSe 表面生成 ZnS 壳层。电镜实验结果发现经紫外光照射处理后 ZnSe 粒径显著增加,证明在 ZnSe 表面形成了 ZnS 壳。

2.3 ZnO 量子点

ZnO 量子点也是一种宽禁带半导体材料。ZnO 的结构为六方晶体纤锌矿结构,晶格常数 $a = 3.249, c = 5.206$ 。ZnO 晶胞中每个 Zn 原子与 4 个 O 原子按四面体分布,室温下其禁带宽度为 3.37eV,激子束缚能高达 60meV,比室温热离化能(26meV)大很多,激子不易发生热离化。由于具有高束缚能的激子更容易在室温下实现高效率的受激发射,与 ZnSe(22meV)、ZnS(40meV)相比,ZnO 是一种室温下优良的

紫外发光材料。ZnO 量子点在水相中的光学稳定性和水溶性很差,因此直接应用将不符合生物检测的要求而难以被推广应用,但可以通过表面修饰解决这些问题,目前这方面的研究热点是用不同稳定剂修饰 ZnO 量子点。如庄稼等^[26]首次报道了利用 3-巯丙基三乙氧基硅烷包覆 ZnO 量子点,合成了水溶性 ZnO 量子点。他们还采用 SiO_2 包覆 ZnO 荧光量子点,使其荧光发射峰峰形对称,没有明显的红移拖尾,半峰宽仅为 46nm。Huanming Xiong 等^[27]合成了能发射蓝色荧光的 ZnO @聚合物核壳型量子点如 ZnO @PMMA(聚甲基丙烯酸酯)和 ZnO @PS(聚苯乙烯)。有机物在新合成的 ZnO 表面通过自由基聚合生成聚合物壳层,大大增强了 ZnO 对光的稳定性和荧光量子产率。他们研究发现用聚合物包覆 ZnO 可以改变其能带结构而使其发射不同波长的荧光,有利于拓展 ZnO 的应用领域。

2 结语

虽然当前对低毒性或生物相容性量子点的研究已经取得了很多成果,但还有一些关键问题没有解决,主要体现在以下 2 个方面。

(1) 低毒性或生物相容性量子点性能的问题。已经报道的低毒性或生物相容性量子点的发射光谱集中在紫外和蓝色波段而且荧光量子产率较低,显然远不能满足实际应用要求。以后的研究重点应着眼于扩宽低毒性或生物相容性量子点的发射波长范围及提高其荧光性能。

(2) 低毒性或生物相容性量子点应用方面的问题。虽然低毒性或生物相容性量子点有良好的生物相容性,安全程度较高,但是由于其使用过程将涉及到较多的生物环境问题,这些复杂环境将如何对量子点的荧光性能和稳定性产生影响、量子点在生物体内的代谢过程机理又是如何进行的也都需要作更深入的系统研究。

随着对低毒性或生物相容性量子点的性能、制备手段及应用研究的不断深入,上述一些问题将得到有效地解决。低毒性或生物相容性量子点材料也将为人类生命健康事业做出应有的贡献。

参考文献

- 1 Bruchez M, Moronne M, Alivisatos A P, et al. semiconductor nanocrystals as fluorescent biological labels [J]. Science, 1998, 281:2013
- 2 Stephen J Kennel, Jonathan D Woodward, et al. The fate of Mab-targeted $Cd^{125m}Te/ZnS$ nanoparticles in vivo [J]. Nuclear Medicine and Biology, 2008, 35:501
- 3 Wen Jiang, Anupam Singhal, et al. Assessing near-infrared quantum dots for deep tissue, organ, and animal imaging applications [J]. J Association Laboratory Automation, 2008, 13(1):6
- 4 Cheng Fong-Yu, Saprina Ping-Hsien Wang, et al. Stabilizer-free poly(lactide-co-glycolide) nanoparticles for multimodal biomedical probes [J]. Biomaterials, 2008, 29:2104

- 5 Zhong Liyun, Liao Wentao, et al. Detection the specific marker of CD3 molecules of human peripheral blood T lymphocytes using SNOM and quantum dots [J]. *Colloids Surf A: Physicochem Eng Aspects*, 2008, 313-314: 642
- 6 Xing Yun, So Min-kyung, et al. Improved QD-BRET conjugates for detection and imaging [J]. *Biochem Biophys Res Commun*, 2008, 372: 388
- 7 徐海娥, 闫翠娥. 水溶性量子点的制备及应用[J]. *化学进展*, 2005, 17(5): 800
- 8 王琰, 侯延冰, 唐爱伟, 等. 水相中 CdTe 纳米晶的制备及其光学性质[J]. *物理化学学报*, 2008, 24(2): 296
- 9 Deng Dawei, Qin Yuanbin, et al. The selective synthesis of water-soluble highly luminescent CdTe nanoparticles and nanorods: The influence of the precursor Cd/Te molar ratio [J]. *J Cryst Growth*, 2006, 296: 141
- 10 Li Hui, Shih Wan Y, Shih Weiheng. Stable aqueous ZnS quantum dots obtained using (3-mercaptopropyl) trimethoxysilane as a capping molecule [J]. *Nanotechnology*, 2007, 18: 495605
- 11 Li Hui, Shih Wan Y, et al. Non-heavy-metal ZnS quantum dots with bright blue photoluminescence by a one-step aqueous synthesis[J]. *Nanotechnology*, 2007, 18: 205604
- 12 Murray C B, Norris D J, Bawendi M G. Synthesis and characterization of nearly monodisperse CdE (E = sulfur, selenium, tellurium) semiconductor nanocrystallites [J]. *J Am Chem Soc*, 1993, 115: 8706
- 13 Yu Fengliao, Wen Jiangli. Synthesis of CdSe quantum dots via paraffin liquid and oleic acid [J]. *J Zhejiang Univ Sci A*, 2008, 9(1): 133
- 14 Dubertret B, Skourides P, Norris D J, et al. In vivo imaging of quantum dots encapsulated in phospholipid micelles [J]. *Science*, 2002, 298: 1759
- 15 Kun Han, Zheng Xiang, et al. Preparation of monodisperse CdTe nanocrystal-SiO₂ microspheres without ligands exchange [J]. *Colloids Surf A: Physicochem Eng Aspects*, 2006, 280: 169
- 16 Selvan S T, Tan T T, et al. Robust, non-cytotoxic, silica-coated CdSe quantum dots with efficient photoluminescence [J]. *Adv Mater*, 2005, 17(3): 1620
- 17 郁美娟, 刘维学, 等. 巯基乙酸稳定的 CdSe/ZnS 核壳结构量子点的制备与表征[J]. *硅酸盐学报*, 2007, 35(7): 822
- 18 钟萍, 俞英, 陈波, 等. 水溶性 CdSe/CdS 纳米晶合成条件的优化研究[J]. *化学研究与应用*, 2006, 18(3): 225
- 19 Rui Yang, Yu Xiyan, et al. A rapid and facile method for hydrothermal synthesis of CdTe nanocrystals under mild conditions [J]. *J Nanosci Nanotechnol*, 2006, 6: 215
- 20 Guo G N, Liu W, et al. Probing the cytotoxicity of CdSe quantum dots with surface modification [J]. *Mater Lett*, 2007, 61(8-9): 1641
- 21 Cho S J, Maysinger D, Jain M, et al. Long-term exposure to CdTe quantum dots causes functional impairments in live cells [J]. *Langmuir*, 2007, 23(4): 1974
- 22 谢颖, 徐静娟, 余俊生, 等. 水溶性的 CdSe/ZnS 纳米微粒的合成及表征[J]. *无机化学学报*, 2004, 20(6): 664
- 23 Li Yongxin, Chen Jinlong, et al. Preparation and application of cysteine-capped ZnS nanoparticles as fluorescence probe in the determination of nucleic acids [J]. *Specrochim Acta Part A: Mole Biomeolecular Spectroscopy*, 2004, 60: 1719
- 24 Shavel A, Gaponik N, Eychmueller A. Efficient UV-blue photoluminescing thiol-stabilized water-soluble alloyed ZnSe(S) nanocrystals [J]. *J Phys Chem B*, 2004, 108: 5905
- 25 李舒艳, 吴川六, 黄朝表, 等. 水相合成 ZnSe 量子点光诱导荧光增敏的 pH 效应 [J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2007, 46(6): 817
- 26 庄稼, 迟燕华, 刘猛. 水溶性 ZnO 量子点制备及其光学性质 [J]. *高等学校化学学报*, 2007, 28(12): 2246
- 27 Xiong Huanming, Xie Dongping, Guan Xiaoyan, et al. Water-stable blue-emitting ZnO @polymer core-shell microspheres [J]. *J Mater Chem*, 2007, 17: 24

(责任编辑 王 炎)

理化所在纳米材料增强酶生物传感器研究方面取得新进展

在国家自然科学基金重点项目的支持下,由中科院理化技术研究所唐芳琼研究员带领的纳米材料可控制备与应用研究组在纳米增强的酶生物传感器研究方面取得重要进展。

纳米材料由于具有高比表面积、高表面活性及小尺寸等特性使它对外界环境,如温度、光、电、气压等十分敏感,外界环境的改变会迅速引起表面或界面粒子价态和电子运输的变化。利用这些显著变化可以组装传感器,其特点是响应速度快,灵敏度高,选择性优良。

唐芳琼带领的研究组分别将金属纳米颗粒、半导体颗粒和棒状材料引入到酶生物传感器的组装研究中,都得到了显著的增强效果。此次报道的研究成果是采用四氧化三铁纳米颗粒构建高灵敏度葡萄糖生物传感器,实验结果显示传感器线性范围为 $6 \times 10^{-3} \sim 2.2 \text{ mmol}$,灵敏度达 $11.54 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2} / \text{mmol}$ 。与以往研究不同的是,由于磁性纳米颗粒具有类似过氧化氢酶的作用,在酶生物传感器中能够更好地促进电子传递,从而提高电极的电流响应。研究表明该生物传感器具有良好的抗干扰性,在实际血清的检测中表现出很好的检测效果,与现有临床方法检测结果相比,标准偏差均在 3% 以内,有很强的实用性。因此,本项研究成果有助于进一步促进生物传感器向超微型化、智能化、实用化发展。

(来源:中科院理化技术研究所)