

# 量子点在光放大器中的应用进展

曾 凤 张振娟

(南通大学电子信息学院, 江苏 南通 226019)

**摘要** 新型的量子点光放大器以宽带宽、高增益、低噪声和高功率放大等优点而得到发展和应用。从量子点的结构和主要特性出发,概述了常用的几种量子点在光放大器方面的研究和应用状况。随后,介绍了量子点半导体光放大器和量子点光纤放大器的基本结构以及工作机理,简述了 CdSe/ZnS 量子点光纤的光谱特性,提出了进一步发展量子点光放大器有待解决的问题,展望了量子点在光通信领域的应用前景。

**关键词** 光学器件;量子点;半导体光放大器;光纤放大器;掺杂光纤

**中图分类号** TN304.2      **文献标识码** A      **doi**: 10.3788/LOP50.020009

## Applications Progress of Quantum Dots in Optical Amplifiers

Zeng Feng Zhang Zhenjuan

(School of Electronics and Information, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226019, China)

**Abstract** Novel quantum-dot optical amplifiers obtain development and applications, because they possess the advantages of broader bandwidth, higher gain, lower noise and higher power amplification. Starting from the structure and main characteristics of quantum dots, this paper summarizes the research and application status of several common quantum dots in optical amplifiers. Whereafter, the basic structure and working mechanisms are emphatically introduced for the quantum-dot semiconductor optical amplifiers and fiber amplifiers. The spectral characteristics of CdSe/ZnS quantum-dot optical fiber are briefly described. Some problems awaiting solution to further developing quantum-dot optical amplifiers are proposed and an outlook is given for quantum-dots applications in optical communication field.

**Key words** optical devices; quantum dot; semiconductor optical amplifiers; fiber amplifiers; doped fiber

**OCIS codes** 230.4480; 060.2320; 270.5570; 140.4480

## 1 引言

光放大器是指使光信号在传输过程中保持其特征不变的条件下,增强光信号功率的有源设备。简而言之,光放大器的功能是使光信号得到放大。在光放大器出现之前,光通信系统中传输的信号光需要通过光电变换与电光变换来获得放大,这种装置较为复杂,耗能多,且不能同时放大多个波长信道。自从有了直接放大光信号的光放大器,传统的中继器便很快被淘汰。光放大器的出现,无疑是光纤通信发展史上一个重要的里程碑。

目前,开发成功并产业化的光放大器有 3 种类型:半导体光放大器(SOA),掺稀土光纤放大器[如掺铒光纤放大器(EDFA)和掺镨光纤放大器(PDFA)];非线性光纤放大器[如光纤拉曼放大器(FRA)和光纤布里渊放大器(FBA)]。其中,掺稀土光纤放大器应用最为广泛,尤其是 EDFA 已成为全光网通信中的主力放大器<sup>[1,2]</sup>。EDFA 能够对光信号进行直接放大,具增益高、噪声低、传输距离长等优点。然而,EDFA 自身却存在无法克服的缺陷,如带宽较窄(约占整个通信窗口的 30%)<sup>[3]</sup>、增益平坦度不理想等。随着全光网通信对光传输容量要求的提高,迫切需要光纤放大器拥有更宽光谱和平坦增益的特性。近年来,人们尝试在 EDFA 纤芯中掺入一些其他的稀土元素(如铥、镱等)<sup>[4]</sup>,并将掺杂光纤设计成双向、反向、环形以及多级抽运等许多不同的结构<sup>[5]</sup>,试图增加光纤放大器的带宽和平坦增益。除此之外,研究人员还将 EDFA 与其他的

**收稿日期**: 2012-09-10; **收到修改稿日期**: 2012-11-16; **网络出版日期**: 2013-01-04

**基金项目**: 南通市应用研究计划(BK2011024)和南通大学自然科学基金(11Z063)资助课题。

**作者简介**: 曾 凤(1981—),女,硕士,助教,主要从事量子点光纤放大器方面的研究。E-mail: zengfeng@ntu.edu.cn

光纤放大器(如 FRA)级联起来<sup>[6,7]</sup>,使之同时具备高平坦增益度和宽带宽的特性。然而,经过数十年的研究和发展,这种掺天然元素的光纤放大器的增益和带宽等关键指标已达极限。在此形势下,人工纳米材料量子点(QD)成为了国内外研究人员的研究热点,量子点成为了新的光增益和放大介质而被应用到光放大器中,一种新型光放大器——量子点光放大器应运而生。

本文概述几种常见的量子点光放大器的研究和应用状况,介绍了量子点 SOA 和量子点光纤放大器的结构和工作原理,探讨了 CdSe/ZnS 量子点光纤的光谱特性,并对量子点放大器的发展前景及量子点在能信领域的应用前景做了展望。

## 2 量子点的基本结构及主要特性

自 1970 年 Esaki 等<sup>[8]</sup>提出超晶格的概念之后,低维的半导体材料量子线和量子点成为了人们的研究热点。所谓量子点,是指尺寸为 1~100 nm 的准零维半导体纳米晶粒,每个量子点由少量的原子构成,且均匀分散在光学透明材料中。由于量子点尺寸小于其体材料的激子玻尔半径,因而表现出强烈的量子限域效应、量子尺寸效应、介电效应及表面效应,呈现出一种独特的光电性质,进而在材料学、物理学、生物学等诸多领域备受关注<sup>[9,10]</sup>。目前,量子点合成方法相当成熟,常用的方法有外延生长法、水相合成法、溶胶-凝胶法、本体聚合法等<sup>[11~13]</sup>。量子点的种类繁多,如 CdSe、CdS、CdTe、ZnS、GaAs、InAs、InP、PbSe、PbS 等,它们分别由 II-VI 族、III-V 族和 IV-VI 族元素组成。其中应用较多的当属 II-VI 族或 III-V 族元素组成的半导体量子点,它们的吸收和辐射光谱几乎覆盖了整个 490~2300 nm 波段<sup>[14]</sup>。

### 2.1 量子点的基本结构

目前,已合成的量子点主要有这样 3 种类型:核结构的量子点(例如 CdSe、PbSe、PbS),核/壳结构的量子点(例如 CdSe/ZnS),核/壳/壳结构(如 CdS/HgS/CdS)。

最初,人们大多研究 II-VI 族、III-V 族元素组成的核结构量子点。通常来说,这种核结构的量子点的荧光量子产率不高,光化学稳定性较差,并且存在大量的表面缺陷。为了克服单核结构引起的种种不利因素,科研人员通过无数次的实验探究,研制出一种半导体材料包覆单核量子点颗粒的核/壳型量子点。该结构量子点的出现有效地解决了单核量子点易受到杂质和晶格缺陷等因素影响的问题,并且使得荧光量子产率有了显著的提高,可高达 85%<sup>[15]</sup>。此外,较单核量子点而言,量子点的消光系数也有数倍的增加,因而有很强的荧光发射,可大大提高信号检测灵敏度。因此,近年来,科研人员又开始热衷于核/壳结构的量子点的研究,甚至是多包层包覆的核/壳/壳结构的量子点。

### 2.2 量子点的主要特性

当纳米晶粒的尺寸减小到一定程度时,吸收光谱向短波方向移动的现象被称为量子尺寸效应。当晶粒减小时,半导体载流子被限制在一个小尺寸的势阱中,连续的能带分裂为分立的能级,从而使得半导体有效能级差增大,吸收光谱向短波方向移动。简而言之,随着量子点尺寸的逐渐减小,量子点的吸收光谱出现蓝移现象,并且尺寸越小,量子尺寸效应越显著。除此之外,量子点在量子限域效应的作用下,激子的最低能量向高能方向移动,也会增强量子点吸收光谱的蓝移。

介电限域效应是指在半导体纳米材料表面修饰一层某种介电常数较小的介质时,被包覆的纳米材料中电荷载体的电力线更易穿过这层包覆膜,从而导致它的光学性质发生较大的变化。纳米材料与介质的介电常数数值相差越大,产生的介电限域效应越明显,吸收光谱红移量就越大。

量子点有着独特的表面效应,这是因为量子点的粒径非常小(通常为 1~10 nm),大部分原子位于量子点的表面,这势必导致量子点有大的比表面积,且随量子点粒径减小而增大。比表面积越大,表面原子数越多,引起表面原子配位不足,不饱和键和悬键增多,进而导致表面原子的活性增强,极易与其他原子发生反应。表面原子的高活性还会引起表面电子自旋和电子能谱的变化,产生陷阱电子和空穴,从而影响量子点的发光性质、出现非线性光学效应,导致量子点的荧光发射发生变化。

## 3 光放大器中常用的几种量子点

由于量子点具备良好的光增益和放大特性,因而在光纤通信行业备受关注。在量子点的制备过程中,人

们通过控制生长或反应时间以及制备条件,来调节量子点的大小,从而改变其吸收和发射光谱,达到调控其吸收峰和辐射峰的峰值波长的目的。近年来,国内外研究的量子点光放大器所应用的量子点主要有 InAs/GaAs 和 InAs/InP, CdSe/ZnS, PbS 和 PbSe 量子点。

### 3.1 InAs/GaAs 和 InAs/InP 量子点

InAs/GaAs 和 InAs/InP 量子点大多应用于量子点激光器和 SOA 中。这类量子点的结构和光学性质很大程度上受到制备方法和生长条件的影响。目前,人们制备 InAs/GaAs 和 InAs/InP 量子点主要采用分子束外延(MBE)和金属有机化学气相沉积(MOCVD)生长技术。这两种制备方法各有利弊,MBE 利于生长参数的调控及生长过程的监控,而 MOCVD 适合大规模生长,具备良好的商业前景。由于量子点生长过程极为复杂,当前高质量光电器件中的 InAs/GaAs 量子点仍主要采用 MBE 技术得到<sup>[16]</sup>。

InAs/GaAs 和 InAs/InP 两种量子点的适用波段不同。前者主要适用于 1300 nm 波段的量子点器件,而后者适用于 1550 nm 波段的量子点器件。此外,InAs/GaAs 量子点晶格失配高达 7%,而 InAs/InP 量子点仅为 3%,所以 InAs/GaAs 体系量子点的浸润层更薄,量子点尺寸更小,均匀性也更好<sup>[17]</sup>。在相同的制备条件下,得到 InAs/GaAs 量子点的质量相对较高。

田苋<sup>[18]</sup>报道了不同温度下 InAs/GaAs 量子点的光致发光(PL)光谱[图 1(a)]。结果表明,不同基态波长随温度的升高而出现红移,改变了 InAs/GaAs 量子点的发光性质。不难看出,量子点发光特性与其生长温度有关。

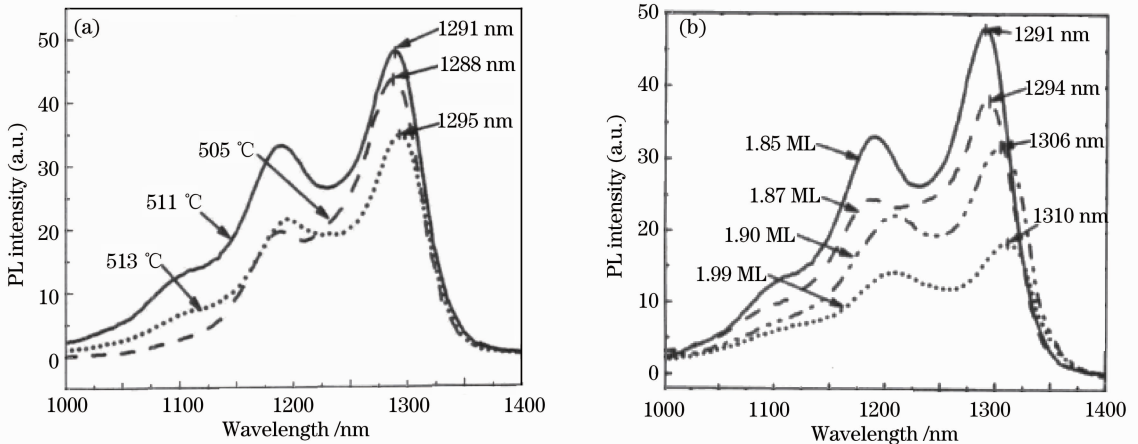


图 1 (a)不同生长温度和(b)不同沉积厚度下 InAs/GaAs 量子点的 PL 谱<sup>[18]</sup>

Fig. 1 PL spectra of the InAs/GaAs QD with (a) different growth temperatures and (b) different deposition thickness<sup>[18]</sup>

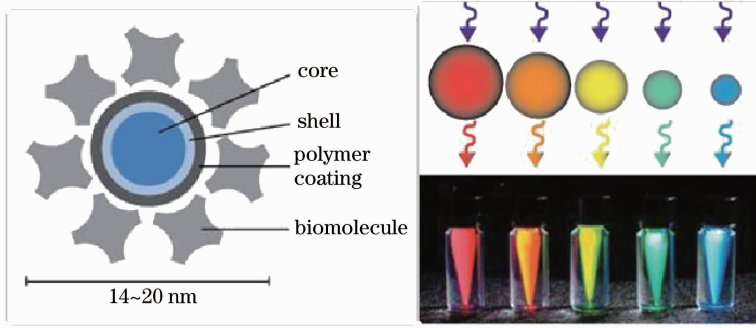
图 1(b)为不同沉积厚度下的光致发光光谱。从图中可见,随着 InAs 沉积厚度的增加,量子点分子的基态发光峰逐渐红移,表明沉积厚度也会影响量子点的光致发光光谱。除了量子点的生长温度和沉积厚度外,影响量子点结构和发光特性的因素还有很多,如何才能制备出适用于光电器件的最佳量子点还有待进一步研究。

### 3.2 CdSe/ZnS 量子点

CdSe/ZnS 是典型的核/壳结构的量子点,单核结构的 CdSe 通过 ZnS 包覆过后,其杂质和晶格缺陷得到了有效的抑制。与单核结构的 CdSe 相比,荧光量子产率有了显著的提高,可高达 85%。CdSe/ZnS 量子点的基本结构如图 2 所示<sup>[19]</sup>。

由图 2 可见,CdSe/ZnS 量子点的光谱落在可见光区域,并且其吸收谱和辐射谱随量子点尺寸的变化而变化。量子点尺寸越小,其光谱蓝移现象越明显,吸收峰和辐射峰向短波方向移动越显著。当 CdSe/ZnS 量子点的尺寸小于其激子半径(5 nm)时就会表现出强烈的量子尺寸效应<sup>[20]</sup>,从而得到带隙可调的 CdSe/ZnS 量子点。

程成等<sup>[21]</sup>研究了 CdSe/ZnS 量子点的紫外吸收光谱和辐射光谱(图 3)。在 473 nm 激励光的作用下,核直径为 4 nm 的 CdSe/ZnS 量子点的第一吸收峰位于 580 nm,第一辐射峰位于 591 nm。其结果也表明 CdSe/ZnS 量子点的光谱落在可见光范围内。

图 2 CdSe/ZnS 量子点的结构及光谱特性<sup>[19]</sup>Fig. 2 Structure and spectral characteristic of CdSe/ZnS QD<sup>[19]</sup>

### 3.3 PbSe 和 PbS 量子点

PbSe 和 PbS 均为由 IV-VI 族元素组成的核结构量子点。相对于 II-VI 族和 III-V 族的量子点来说,它们有着较大的激子玻尔半径,PbSe 为 46 nm,PbS 为 18 nm<sup>[22,23]</sup>,因此其表面缺陷对量子点的影响非常小。故核结构的 PbSe 和 PbS 量子点同样表现出较强量子限域效应和量子尺寸效应。

早在 1997 年,Kang 等<sup>[23]</sup>即通过包络函数公式从理论上研究了 PbSe 和 PbS 量子点的光电学结构以及特性,得到了量子点吸收峰波长与晶粒半径关系的包络函数公式。这为 PbSe 和 PbS 量子点的实验研究积淀了理论基础。在研究初期,PbSe 和 PbS 量子点生长在玻璃基体中,想要合成小尺寸胶体量子点非常困难。直到 2001 年,Murray 等<sup>[14]</sup>报道合成了高质量的胶体 PbSe 量子点,使得 PbSe 量子点的应用愈加广泛。近年来,国内外研究人员大多采用熔融法制备掺 PbSe 量子点的玻璃,并对其吸收谱和发射谱进行分析。2002 年,Kolobkova 等<sup>[20]</sup>用熔融法制得了掺 PbSe 量子点磷酸盐玻璃,实验得到其吸收谱。2006 年,Silva 等<sup>[24]</sup>报道了熔融法制备的掺 PbSe 量子点硅酸盐玻璃,分析了此玻璃的吸收谱。2008 年,Melekhin 等<sup>[25]</sup>报道了用熔融法制得的掺 PbSe 量子点磷酸盐玻璃的吸收谱,获得了 6 种不同尺寸的量子点,并分别指出其第一激子吸收峰。2009 年,Chang 等<sup>[26]</sup>制备了掺 PbSe 量子点的硼硅酸盐玻璃,分析了荧光发射谱和吸收谱。2011 年,程成等<sup>[27]</sup>报道了熔融法制备 PbSe 量子点钠硼铝硅酸盐玻璃。有关 PbS 量子点的报道也不胜其数。

当 PbS 量子点的尺寸在 2~9 nm 之间时,其发射光谱位于近红外的 850~1800 nm 范围内,覆盖了整个通信波段(1300~1550 nm)。通过控制此量子点的尺寸,可以调节量子点的吸收和发射光谱,从而可将其半峰全宽控制在 150~200 nm 内。近年来,PbS 量子点越来越多地应用于光通信领域中。

## 4 量子点在光放大器中的应用与研究概况

由于量子点具有独特的吸收光谱和辐射光谱,因而国内外研究人员将其用于光放大器的研究,试图研制出宽光谱、高增益和低噪声的新型光放大器,其成功研制对于光纤通信的发展具有重大的意义。

### 4.1 量子点半导体光放大器

20 世纪 70 年代初,由于光纤工艺不够成熟,损耗成为制约光纤通信发展的重要因素,因此,在长距离光通信传输系统中需要对光信号进行放大。鉴于传统的光-电-光(O-E-O)中继转换存在系统复杂、能耗高以及成本高等问题,人们研制出能够对光信号直接放大的 SOA,它的出现不仅降低了成本,且体积小,与其他光电器件的兼容性好,更重要的是 SOA 放大光信号可得到较宽的增益带宽。有研究表明,SOA 的非线性效应在全光信号处理上具有独特的优势<sup>[28,29]</sup>。发展至今,SOA 经历了从三维体材料向低维纳米材料(量子阱、

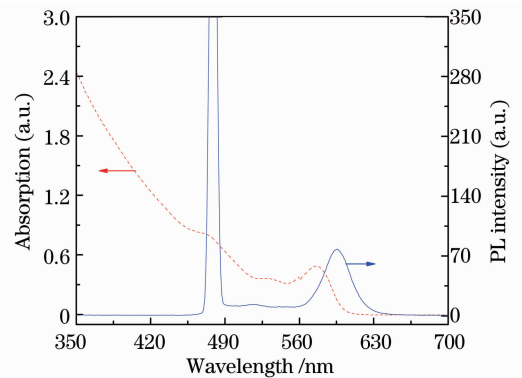


图 3 CdSe/ZnS 量子点胶体的吸收谱和发射谱

Fig. 3 Absorption and PL spectra of the CdSe/ZnS QD colloid

量子线和量子点)的过程。与体材料 SOA 相比,低维纳米材料 SOA 具有更大的增益、更高的饱和输出功率、更好的温度稳定性以及更短的增益、相位恢复时间。而在低维纳米结构 SOA 中,性能最为突出的当属量子点 SOA。20 世纪 90 年代以后,自组织生长的量子点技术得到了飞速的发展,使得量子点 SOA 成为光放大器的研究热点之一。

量子点 SOA 的基本能级结构是由基态、激发态和浸润层组成的三能级系统。如图 4 所示,注入的载流子首先分布到浸润层,然后进入激发态和基态;部分载流子通过辐射复合或非辐射复合到达浸润层、激发态、基态。

早在 1999 年,Akiyama 等<sup>[31,32]</sup>便将量子点引入了 SOA 有源区,获得了超快增益恢复特性和增益非线性效应的 SOA——量子点 SOA,它在很大程度上超越了传统 SOA 的性能。历经十几年的发展,科研人员从理论模型、静态特性、动态特性、非线性、偏振相关性等多方面对量子点 SOA 进行了研究,并获得了可喜的成果,为量子点 SOA 在光通信领域的应用奠定了坚实的基础。例如,2007 年,Akiyama 等<sup>[33]</sup>研制出超宽带、高功率的量子点 SOA,其增益超过 25 dB,增益带宽大于 90 nm,饱和输出功率大于 20 dBm,噪声指数低于 5 dB,代表了当时最佳参数指标的量子点 SOA。2010 年,Rostami 等<sup>[34]</sup>利用量子点 SOA 具备处理和转换超快全光信号的能力进行了光逻辑门的研究,报道了转换能力为 2.5 Tb/s 和 2 Tb/s 时的品质因子(Q)分别可下降到 4.9 和 8.8,表明量子点 SOA 能够应用于超高速全光逻辑门、全光开关等设备。近两年来,有关量子点 SOA 的报道主要集中在增益特性的研究方面,例如 Taleb 等<sup>[35]</sup>分析比较了不同抽运方式下量子点 SOA 的增益特性(电抽运、光抽运和光电抽运),发现电抽运量子点 SOA 效率最高,不仅得到的光增益最高,而且增益和相位恢复时间也缩短了。Mohadesrad 等<sup>[36,37]</sup>引入了多级结构的量子点 SOA,采用速率方程建模和有限元分析方法,得到量子点 SOA 的光增益提高了近 10%。他们还对比了二极量子点 SOA 电极长度进行了详细研究,然望找到具有最大光增益的电极长度,通过模拟分析认为第一电极与第二电极长度之比为 4:1 时,二极结构的量子点 SOA 增益最大。这也进一步说明量子点 SOA 的增益以及相位恢复速度具备提升的空间。在国内量子点 SOA 的研究起步稍晚,近年来虽有迅速的发展,但研究深度与国外还有一定差距。目前主要的研究内容集中在量子点 SOA 的理论研究和应用以及基于量子点 SOA 的光学器件的研究,如全光逻辑或门研究、转换器等。

总体来讲,经过多年的理论和实验探索研究,量子点 SOA 较传统的 SOA 在超高速光信号传输和处理方面显示出突出的优势,主要表现在放大带宽较宽、饱和功率高、增益恢复速度快、偏振灵敏度低、温度敏感性低等特点。除此之外,量子点 SOA 在线性放大和非线性信号处理方面也表现出很大的优势。尽管如此,现有的量子点量子点 SOA 仍然存在一些不足之处,例如稳定性和噪声特性不及光纤放大器,这在一定程度上制约了量子点 SOA 的应用范围,但另一方面也指明了今后量子点 SOA 的发展方向。

## 4.2 量子点光纤放大器

量子点应用于光放大器,并不局限于 SOA 方面,光纤放大器同样引入了量子点作为光增益和放大介质。国外对量子点光纤放大器的理论研究较国内早。早在 2002 年,Wise<sup>[38]</sup>便提出用 PbSe 和 PbS 量子点掺杂光纤做成光纤放大器的构想,并给出了量子点光纤放大器的理论模型。2003 年,Qasaimeh<sup>[39]</sup>也构建了量子点光放大器的理论分析模型,并对此做了大量的理论推导和分析。之后三四年的时间里,量子点光纤放大器在国内外几乎没有报道。近两年,国外出现了量子点掺杂光纤的研究,而量子点光纤放大器的研制仍然未见报道。

在国内,虽然量子点光纤及量子点光纤放大器的研究起步较晚,但发展非常迅猛。许多科研机构开展了量子点光纤放大器的研究,他们虽在量子点光纤放大器理论模型和基本结构上不尽相同,但均利用了量子点的光增益和放大特性<sup>[40~44]</sup>。2006 年,程成等<sup>[40]</sup>提出了基于量子点光纤的量子点光纤放大器(QDFA)理论,此后研究人员相继对多粒度量子点共掺全波段光纤放大器做了系统的理论研究,详尽地模拟、优化了

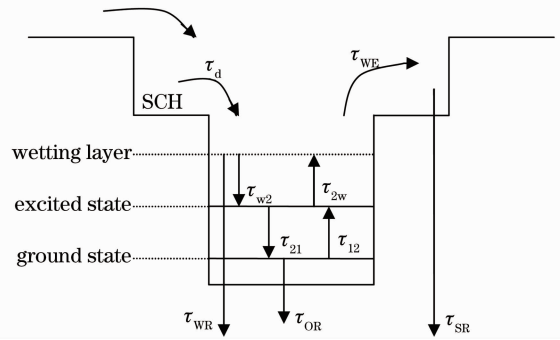


图 4 量子点 SOA 的能带图<sup>[30]</sup>

Fig. 4 Energy band diagram of the QD-SOA<sup>[30]</sup>

QDFA 的增益、带宽和噪声系数等主要指标。程成等提出的 QDFA 的基本结构如图 5 所示,其核心部分是量子点光纤。信号光在量子点光纤中被激励放大。由此可见,QDFA 的工作机理与 EDFA 非常类似,不同点在于前者以量子点为增益介质,光纤中的量子点在吸收了抽运光能量后,从基态向高能级跃迁,而后再迅速到达亚稳态,在抽运源的激励作用下实现粒子数反转,当信号光通过时,发生受激辐射而产生光放大。

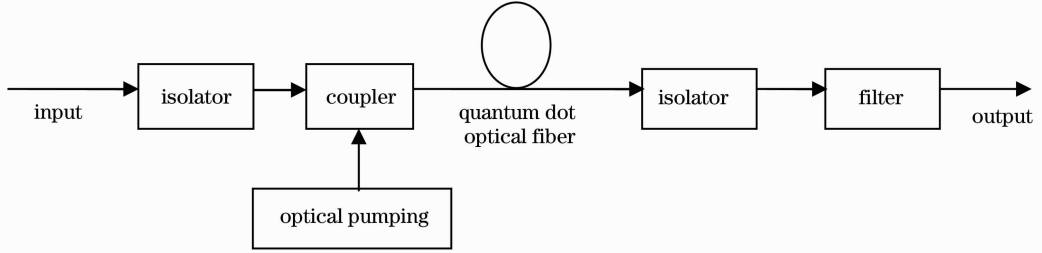


图 5 QDFA 的基本结构

Fig. 5 Basic structure of the QDFA

研究表明,多掺杂 QDFA 具有极宽的带宽和极低的噪声,在优化之前它在 20 dB 增益以上的一 1 dB 平坦带宽可达 120 nm,噪声系数低至 3.3 dB,这是常规 EDFA 所不能比拟的。

与此同时,量子点光纤的研究有了新的进展。例如,2004 年,本文作者研究了量子点掺杂光纤的光谱特性,结果表明量子点的种类和浓度以及掺杂光纤的长度等因素均会影响量子点掺杂光纤的光谱特性<sup>[41]</sup>。图 6 给出了 473 nm 激光光源激励下的 CdSe/ZnS 量子点光纤在不同掺杂浓度下的 PL 光谱。由图中可见量子点掺杂浓度不同,量子点光纤的 PL 光谱随之发生变化。另外,当量子点掺杂浓度为 0.27 mg/mL 时,量子点光纤的 PL 峰值强度出现最大值,表明有一个最适合制备量子点光纤的量子点浓度,这是研究量子点掺杂光纤光谱特性的一个要点内容。

量子点光纤光谱特性的又一个重要研究内容是掺杂光纤的长度。图 7 中给出了量子点掺杂浓度为 0.27 mg/mL 时不同光纤长度下 CdSe/ZnS 量子点光纤的 PL 光谱。由图可见,掺杂光纤的长度不同,量子点光纤的 PL 光谱也会发生变化。

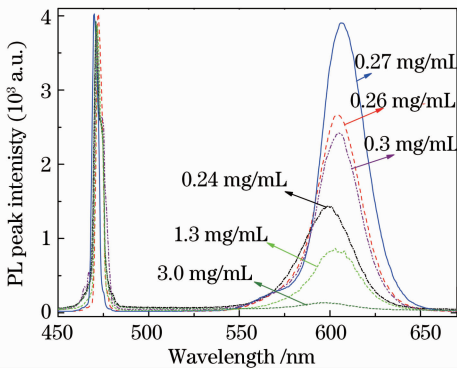


图 6 不同浓度下 CdSe/ZnS 量子点光纤的 PL 光谱  
Fig. 6 PL spectra of the CdSe/ZnS-doped QD fiber with different doping concentrations

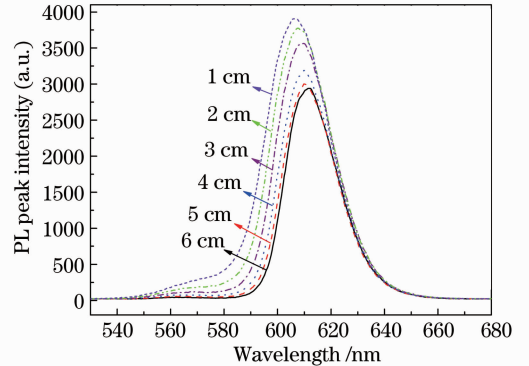


图 7 不同光纤长度下 CdSe/ZnS 量子点光纤的出射端光谱(掺杂浓度  $C=0.27$  mg/mL)  
Fig. 7 PL spectra of the CdSe/ZnS-doped QD fiber with different fiber lengths (doping concentration  $C=0.27$  mg/mL)

近年来,上海大学特种光纤实验室的研究人员们也专注于量子点光纤放大器的研究,开创了独具特色的研究方法。研制成功的有渐逝波耦合半导体量子点光纤放大器<sup>[42,43]</sup>和基于锥形单模光纤的 PbS 量子点光纤放大器<sup>[44]</sup>。隐失波耦合半导体量子点光纤放大器是将 PbS 量子点沉积于耦合器熔锥区而得到的,其基本结构如图 8 所示,这种新颖的量子点光纤放大器将具有放大光谱特性的 PbS 量子点与熔锥光纤渐隐失耦合器件结合起来,信号光、抽运光通过隐失波共同与半导体量子点材料相互作用,实现光信号的放大。实验结果表明,利用 980 nm,功率为 30 mW 的半导体激光器抽运该光纤放大器,在 1310 nm 波段得到了大于 4 dB

的增益。

2012年,Guo等<sup>[44]</sup>研制了基于锥形单模光纤的PbS量子点光纤放大器。该光纤放大器的基本结构如图9所示,其核心部分为量子点包覆的锥形单模光纤,这种结构的光纤能够使光信号得到放大。通过实验验证,该光纤放大器可使光增益达到10.5 dB,带宽达到160 nm,且中心波长位于1530 nm,非常适用于光纤通信系统中的光信号放大。

## 5 结束语

新型的人工纳米量子点材料不仅具有许多体材料所不具备的光物理、光化学和光电性质,而且具有天然元素所无法比拟的优越特性,比如通过控制量子点的尺寸可以调控其吸收和辐射谱以及半峰全宽。将量子点与光放大器的研究结合起来是一项非常有意义的工作,这将极大地推动光纤通信的发展。

近年来,国内外均在积极地投入量子点光放大器的研究,在其种类和性能方面取得了可观的成绩,有望将来成为光纤通信系统的主力放大器。然而,量子点光放大器还有许多方面需要进一步研究和探索,例如如何研制出稳定性和噪声指数更佳的量子点SOA,尽可能地减小其偏振相关性影响;如何选取最适合制备各类光放大器的量子点种类和类型、粒径大小以及掺杂浓度;如何让量子点光放大器走出实验室,达到产品化、商用化等问题。

## 参 考 文 献

- 1 B. J. Ainslie. A review of the fabrication and properties of erbium-doped fibers for optical amplifiers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(2): 220~227
- 2 Yibin Lu, P. L. Chu, A. Alphones *et al.*. A 105-nm ultrawide-band gain-flattened amplifier combining C- and L-band dual-core EDFAs in a parallel configuration[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(7): 1640~1642
- 3 C. R. Giles, E. Desurvire. Modeling erbium-doped fiber amplifiers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(2): 271~283
- 4 Wu Wuming, Yang Weiqiang, Xiao Hu *et al.*. High efficiency inband core-pumped erbium/ytterbium-codoped fiber amplifier[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(6): 060605  
吴武明, 杨未强, 肖 虎等. 高效率纤芯同带抽运铒镱共掺光纤放大器[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(6): 060605
- 5 Song Meimei, Feng Sujuan, Mao Qinghe. Influences of pump schemes on gain properties of L-band double-pass erbium-doped fiber amplifiers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 681~685  
宋梅梅, 冯素娟, 毛庆和. 抽运方案对L波段双通掺铒光纤放大器增益特性的影响[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 681~685
- 6 XueFeng, Xiaoming Liu, Jiande Peng. Numerical comparison on the characteristics between backward and bi-directionally pumped DFAs in hybrid Raman/EDFAs[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(5): 257~260
- 7 Zhou Huijuan, Chen Mo, Chen Wei *et al.*. Brillouin-erbium fiber laser with ultra-short ring cavity[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(7): 0702010  
周会娟, 陈 默, 陈 伟等. 超短环形腔布里渊掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(7): 0702010
- 8 L. Esaki, R Tsu. Superlattice and negative differential conductivity in semiconductors[J]. *IBM. Res. Dev.*, 1970, **14**(1): 61~65
- 9 A. Henglein. Small-particle research: physicochemical properties of extremely small colloidal metal and semiconductor

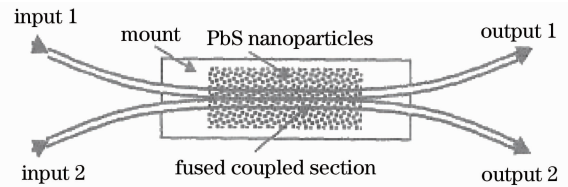


图8 隐失波耦合半导体量子点光纤放大器示意图  
Fig. 8 Schematic diagram of the evanescent-wave coupled semiconductor QDFA structure

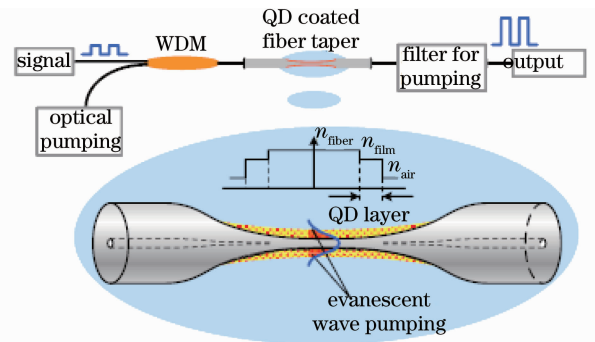


图9 锥形量子点光纤放大器以及量子点包覆的锥形光纤示意图  
Fig. 9 Tapered QD fiber amplifier and QD-coated tapered fiber

- particles[J]. *Chem. Rev.*, 1989, **89**(8): 1861~1873
- 10 A. D. Yoffe. Semiconductor quantum dots and related systems; electronic, optical, luminescence and related properties of low dimensional systems[J]. *Adv. Phys.*, 2001, **50**(1): 1~208
- 11 J. Aldana, Y. A. Wang, Xiaogang Peng. Photochemical instability of CdSe nanocrystals coated by hydrophilic thiols [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2001, **123**(36): 8844~8850
- 12 W. W. Yu, Lianhua Qu, Wenzhuo Guo *et al.*. Experimental determination of the extinction coefficient of CdTe, CdSe, and CdS nanocrystals [J]. *Chem. Mater.*, 2003, **15**(14): 2854~2860
- 13 Cheng Cheng, Wang Ruodong, Yan Jinhua. PbSe/PMMA quantum dot-doped fiber materials fabricated by a bulk polymerization method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0616005  
程 成, 王若栋, 严金华. 本体聚合法制备 PbSe/PMMA 量子点光纤材料[J]. 光学学报, 2011, **31**(6): 0616005
- 14 C. B. Murray, Shouheng Sun, W. Gaschler *et al.*. Colloidal synthesis of nanocrystals and nanocrystal superlattices [J]. *IBM J. Res. Dev.*, 2001, **45**(1): 47~56
- 15 Lianhua Qu, Xiaogang Peng. Control of photoluminescence properties of CdSe nanocrystals in growth[J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2002, **124**(9): 2049~2055
- 16 D. Bimberg. Quantum dots for lasers, amplifiers and computing [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2005, **38**(13): 2055~2058
- 17 Yu Yi. Theoretical Investigation on InAs/GaAs Quantum Dot Semiconductor Optical Amplifier and Quantum Dot Fabrication[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. 62~64  
余 奕. InAs/GaAs 量子点半导体光放大器理论与量子点制备[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011. 62~64
- 18 Tian Peng. Growth of InAs/GaAs Quantum Qots and Fabrication of Two-Section Semiconductor Optical Amplifiers[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. 83~90  
田 芃. InAs/GaAs 量子点生长及两段式半导体光放大器研制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011. 83~90
- 19 Dymax Corporation. OP-4-20632: Ultra Light-Weld High  $T_g$  Light Path Adhesive for Fiber Optic Assembly [OL]. [http://www.dymax.com/products/adhesive\\_products/op-4-20632-series.php](http://www.dymax.com/products/adhesive_products/op-4-20632-series.php), 2010
- 20 E. V. Kolobkova, A. A. Lipovskii, V. D. Petrikov *et al.*. Fluorophosphate glasses containing PbSe quantum dots[J]. *Glass Phys. Chem.*, 2002, **28**(4): 246~250
- 21 Cheng Cheng, Zeng Feng, Cheng Xiaoyu. Photoluminescence spectra of CdSe/ZnS-quantum dot doped fiber with high doping concentrations[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2698~2704  
程 成, 曾 凤, 程潇羽. 较高掺杂浓度下 CdSe/ZnS 量子点光纤光致荧光光谱[J]. 光学学报, 2009, **29**(10): 2698~2704
- 22 F. W. Wise. Lead salt quantum dots: the limit of strong quantum confinement[J]. *Acc. Chem. Res.*, 2000, **33**(11): 773~780
- 23 I. Kang, F. W. Wise. Electronic structure and optical properties of PbS and PbSe quantum dots [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**(7): 1632~1646
- 24 R. S. Silva, P. C. Morais, A. M. Alcalde *et al.*. Optical properties of PbSe quantum dots embedded in oxide glass[J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2006, **352**(32-35): 3522~3524
- 25 V. G. Melekhin, E. V. Kolobkova, A. A. Lipovskii *et al.*. Fluorophosphate glasses doped with PbSe quantum dots and their nonlinear optical characteristics[J]. *Glass Phys. Chem.*, 2008, **34**(4): 351~355
- 26 Jieun Chang, Chao Liu, Jong Heo. Optical properties of PbSe quantum dots doped in borosilicate glass [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2009, **355**(37-42): 1897~1899
- 27 Cheng Cheng, Jiang Huil, Ma Dewei. PbSe quantum dot-doped sodium-aluminum-borosilicate glass fabricated by a melting method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0216005  
程 成, 江慧绿, 马德伟. 熔融法制备 PbSe 量子点钠硼铝硅酸盐玻璃[J]. 光学学报, 2011, **31**(2): 0216005
- 28 H. Ghaforui-Shiraz. The Principles of Semiconductor Laser Diodes and Amplifiers; Analysis and Transmission Line Laser Modelling[M]. London: Imperial College Press, 2004. 15~39
- 29 N. K. Dutta, Qiang Wang. Semiconductor Optical Amplifiers[M]. Singapore: World Scientific Publishing, 2006. 1~32
- 30 O. Qasaimeh. Optical gain and saturation characteristics of quantum-dot semiconductor optical amplifiers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(6): 793~798
- 31 T. Akiyama, T. Shimoyama, H. Kuwatsuka *et al.*. Gain nonlinearity and ultrafast carrier dynamics in quantum dot optical amplifiers[c]. 25th European Conference on Optical Communication, 1999. II-76
- 32 P. Borri, W. Langbein, J. M. Hvam *et al.*. Ultrafast gain and index dynamics in quantum dot amplifiers[C]. 25th



- European Conference on Optical Communication, 1999. II-74
- 33 T. Akiyama, M. Sugawara, M. Ekawa *et al.*. Quantum-dot semiconductor optical amplifiers[J]. *Proc. IEEE*, 2007, **95**(9): 1757~1766
- 34 A. Rostami, H. Nejad, R. M. Qartavol *et al.*. Tb/s optical logic gates based on quantum-dot semiconductor optical amplifiers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2010, **46**(3): 354~360
- 35 H. Taleb, K. Abedi, S. Golmohammadi. Dynamic response of quantum-dot semiconductor optical amplifiers electrical, optical, and electro-optical pumping schemes [C]. 2012 20th Iranian Conference on Electrical Engineering, 2012. 1458~1461
- 36 E. Mohadesrad, K. Abedi. Two and three-electrode structure for quantum-dot semiconductor optical amplifiers[C]. 2012 20th Iranian Conference on Electrical Engineering, 2012. 217~222
- 37 E. Mohadesrad, K. Abedi. Electrode lengths optimization for two-electrode quantum-dot semiconductor optical amplifiers [C]. 2012 20th Iranian Conference on Electrical Engineering, 2012. 281~285
- 38 F. Wise. Quantum dots call the shots [J]. *OEMagazine*, 2002, (10): 24~27
- 39 O. Qasaimeh. An analytical model for quantum dot semiconductor optical amplifiers[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **222**(1-6): 277~287
- 40 Cheng Cheng, Zhang Hang. A semiconductor nanocrystal PbSe quantum dot fiber amplifier[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(8): 4139~4144  
程 成, 张 航. 半导体纳米晶体 PbSe 量子点光纤放大器[J]. *物理学报*, 2006, **55**(8): 4139~4144
- 41 Zeng Feng. Study on Spectral Characteristics of CdSe/ZnS Quantum-Dot Doped Fibers with High Doping Concentrations [D]. Zhejiang: Zhejiang University of Technology, 2010. 45~50  
曾 凤. 高浓度掺杂 CdSe/ZnS 量子点光纤光谱特性的研究[D]. 浙江: 浙江工业大学, 2010. 45~50
- 42 Wang Kexin, Pang Fufei, Wang Tingyun. Evanescent wave coupled semiconductor quantum dots fiber amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 398~401  
王克新, 庞拂飞, 王廷云. 渐逝波耦合半导体量子点光纤放大器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 398~401
- 43 Sun Xiaolan, Dong Yanhua, Li Chao *et al.*. PbSe semiconductor quantum dots fiber amplifier based on sol-gel self-assembly method[C]. 2010 Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition, 2010. 425~426
- 44 Hairun Guo, Fufei Pang, Xianglong Zeng *et al.*. PbS quantum dot fiber amplifier based on a tapered SMF fiber[J]. *Opt. Commun.*, 2012, **285**(13-14): 3222~3227