

PbSe 纳米晶体量子点单/多模光纤激光的实验实现

程 成 薄建凤* 严金华

(浙江工业大学激光与光电子技术研究所, 浙江 杭州 310023)

摘要 以 PbSe 量子点作为激活增益介质, 在由量子点掺杂光纤、波分复用器、光纤光栅等组成的全光纤环形谐振腔中, 实验首次观测到了波长为 1550 nm、稳定连续的激光振荡。在 980 nm 激光二极管(LD)抽运下, 发现了明显的抽运激励阈值。低于激励阈值时, 没有激光; 高于激励阈值时, 激光输出功率随激励功率线性增大。激光输出为多模, 通过光纤弯绕方式可选出单模输出。对于 50 μm 纤芯直径的多模量子点光纤, 当入纤抽运功率为 68 mW 时, 实测激光输出功率为 19.2 mW(多模)和 6.31 mW(单模), 激光的 3 dB 线宽小于 0.1 nm, 抽运效率分别为 28% 和 9.3%。

关键词 激光器; PbSe 量子点; 量子点掺杂光纤; 光纤激光器; 激励阈值

中图分类号 TN253; TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0914001

Experimental Observation of a PbSe Nanocrystal Quantum Dot Doped Fiber Laser with Single/Multiple Modes

Cheng Cheng Bo Jianfeng Yan Jinhua

(Institute of Laser and Optoelectronic Technology, Zhejiang University of Technology,
Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

Abstract A PbSe nanocrystal quantum dot doped fiber laser (QDFL) is achieved in experiment by doping the PbSe quantum dots (QDs) into the fiber and configuring an all-fiber ring resonator consisting of quantum dot doped fiber (QDF), wavelength division multiplexer (WDM), and fiber Bragg grating (FBG). Upon 980 nm laser diode (LD) pumping, an obvious exciting threshold is observed, i. e., lower than the threshold, no laser appears; higher than it, the laser output increases linearly with the pumping power. The laser output is of multiple modes, while single mode can be selected out by bending fiber technique. Upon pump power of 68 mW inputted into the fiber with 50 μm diameter, the laser output power comes to 19.2 mW (multi-mode) and 6.31 mW (single mode) with linewidth less than 0.1 nm, corresponding to pumping efficiency of 28% and 9.3%, respectively.

Key words lasers; PbSe quantum dot; quantum dot doped fiber; fiber laser; exciting threshold

OCIS codes 140.3510; 140.3410; 140.3380; 140.5560

1 引 言

纳米晶体量子点(QD)由于其独特的光学特性而受到人们的极大关注。相比于分子束外延(MBE)自组织生长技术, 纳米晶体量子点的制备技术简单、成本低廉, 量子点的尺寸可做得很小(约 1 nm), 密度分布均一可控, 在实际器件方面展现了极其广泛的应用前景^[1-2]。

目前, 量子点材料制备方法的选择是得到形状、数密度、尺寸以及空间分布可以控制的高质量量子点材料的关键。经过该领域科学工作者多年的努力, 如今已经发展出多种不同的制备方法, 大致可分为纳米物理法和纳米化学法两大类, 例如物理类的分子束外延生长法, 化学类的熔融法、胶体合成法、反胶团合成法、溶胶凝胶法等。目前, 采用 MBE 生

收稿日期: 2013-03-12; **收到修改稿日期**: 2013-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(61274124)

作者简介: 程 成(1953—), 男, 博士, 教授, 主要从事量子点光纤放大器以及激光器等方面的研究。

E-mail: chengch@zjut.edu.cn(中国光学学会会员号: S0420112706)

* **通信联系人**. E-mail: bohaiyuan2010@163.com

长的量子点来构成激光器的方法已经实现,例如 In (Ga)As/GaAs 激光器等。

对于用纳米化学法制备的纳米晶体量子点,人们的研究主要集中在 II-VI 族 CdSe、CdSe/ZnS、CdS 等元素上,它们的辐射波长位于可见区域。例如, Darugar 等^[3]报道了用 400 nm 波长的飞秒激光瞬态吸收技术,激励分散在甲苯溶液中的 CdS 量子点,观测到了在 440 nm 和 460 nm 波长处有窄谱峰的光学增益。Masakazu 等^[4]在 ZnSe/GaAs 基底上生长的 CdSe 纳米晶体量子点薄膜上,观测到了放大自发辐射的激子光学辐射增益。对于辐射位于红外区的 II-VI 族的元素(PbSe, PbS),已报道的研究工作很少。在 PbSe 量子阱方面,Fill 等^[5]报道了硅基底中的 PbSe 中红外量子阱垂直腔面发射激光。Antipov 等^[6]报道了 PbSe 薄膜中具有周期环结构的连续(CW)激光诱导的产生。然而,迄今为止,尚未有在实验室中实现纳米晶体 PbSe QD 激射的报道。

在之前的工作中,对 PbSe 量子点的荧光辐射-吸收特性做过实验研究^[7-8]。根据实验测量的 PbSe 量子点的荧光增益特性,通过数值模拟,发现在短波长抽运光的激励下,PbSe 量子点可以产生受激辐射^[9-10]。在上述工作的基础上,在实验中,以 PbSe 量子点作为激光增益介质,构造了由量子点光纤组成的全光纤环形谐振腔,采用 980 nm 激光二极管(LD)抽运,首次实现了波长为 1550 nm 的稳定、连续的激光振荡。实验发现了产生激射的抽运阈值,当抽运功率低于阈值时,没有激射产生;当抽运功率大于阈值功率时,激射功率随抽运功率线性增大。通过将光纤光栅移去的方式,进一步确认了测量得到的光为受激辐射。采用光纤弯绕技术来消除高阶模,可获得单模激光输出。当入纤抽运功率为 68 mW 时,输出的单模激光功率为 6.31 mW,线宽约为 0.1 nm,抽运效率为 9.3%;输出的多模激光功率为 19.2 mW,抽运效率约为 28%。

2 实 验

2.1 激光器的构成

实验装置如图 1 所示。激光器环形腔由 980/1550 nm 波分复用器(WDM)、掺 PbSe 量子点光纤(QDF)、非偏振光隔离器(ISO)、光纤耦合器和光纤布拉格光栅(FBG)组成。其中 WDM 为单模(9/125 μm ,纤芯/包层)尾纤输出,并与 QDF 直接熔接。QDF 为多模(50/125 μm ,纤芯/包层)光纤,纤芯本底材料为紫外(UV)固化胶,PbSe 量子点掺入其

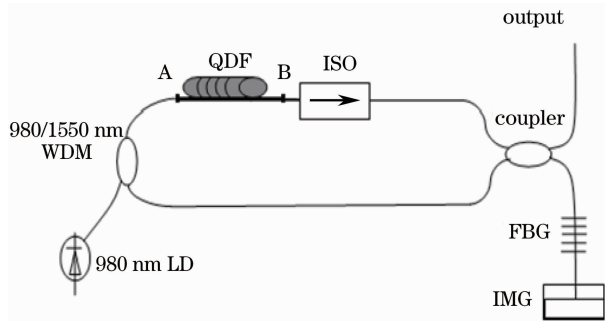


图 1 环形腔掺 PbSe 量子点光纤激光器结构示意图

Fig. 1 Experimental setup for PbSe QD doped fiber laser (QDFL) with a ring resonator

中。耦合器为分光比可调的 2×2 光纤型。FBG 的中心波长为 1550.46 nm,线宽为 0.1 nm,反射率为 97%。ISO 采用特制的多模输入(50/125 μm ,纤芯/包层)/单模输出(9/125 μm ,纤芯/包层),单模输出起到空间滤波作用,隔离度大于 40 dB,使光在环路中沿顺时针方向传播。IMG 为光纤匹配液,它的作用是减少光纤末端面的菲涅耳反射。抽运源采用带输出尾纤的 LD,其中心波长约为 976 nm,最大输出功率为 500 mW。

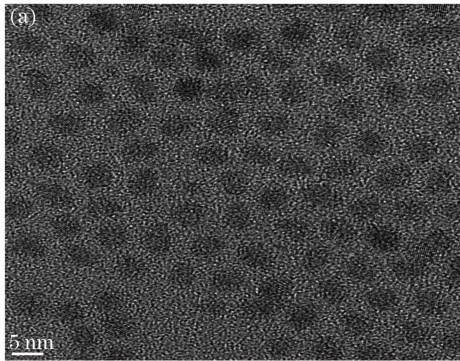
抽运光经过 WDM 耦合进入环路,经熔接点 A 输入 QDF。A 点同时可用于测量实际输入 QDF 的功率。在 QDF 中,量子点吸收抽运能量,辐射峰值波长为 1550 nm 的光。光经过隔离器 ISO 传到耦合器,一部分耦合到输出端,另一部分耦合到 FBG。经过 FBG 后,只有波长为 1550 nm 的光波反射回耦合器。由于 PbSe 量子点的增益带宽比光栅的反射带宽大很多,所以可以认为在 FBG 的反射带宽内 PbSe 量子点对激光器内各纵模的增益是均匀的,进而模式的选择机制只能来自于 FBG。光纤光栅的窄带反射特性限制了只有在很窄的波长范围可以获得增益,并在环路中沿顺时针方向传输,传输一周后获得一定的增益再次到达 FBG,从而实现环路振荡。当所获得的增益大于腔内损耗时,耦合器的输出端得到波长为 1550 nm 的激光输出。

2.2 实验材料与方法

实验所采用的 QDF 为自行设计制备。将平均直径为 5.2 nm 的 PbSe 量子点(溶于正己烷溶剂中)与一定量的 UV 胶同时置于 R-1020 型旋转蒸发器中,根据沸点差异特点,对其进行隔氧(持续通入氮气)蒸发。将正己烷蒸发掉的同时,使量子点溶于 UV 胶,进而配制成不同浓度的 PbSe 量子点 UV 胶溶液。取一定量配制好的溶液,采用日本岛津公司生产的 UV-3150 型紫外可见近红外分光光度计测量其近红外

吸收谱(NIRAS)。UV-3150 型光谱仪的测量范围为 190~3200 nm,扫描精度为 0.01 nm。另取一定量配制好的溶液,采用英国爱丁堡公司生产的 FLSP920 型荧光光谱仪测量其荧光(PL)发射谱。FLSP920 型光谱仪的测量范围为 1200~3500 nm,扫描精度为 0.01 nm。将配制好的 PbSe 量子点溶液通过压力差的方式,灌入大模场面积(50/125 μm ,纤芯/包层)的空心光纤。将待灌装光纤的主体部分置入超声波振荡器中,两端露出,一端深入量子点溶液,另一端接抽真空设备,并对接口密封。待灌装完毕,取出光纤,保持光纤与抽真空设备连接,并放在型号为 XTZ-D 的显微镜下观察,截取未见气泡部分。取一小段芯径更小的实心多模特种光纤(纤芯直径约 40 μm ,外径为 125 μm)与空心光纤对接(便于光纤与其他部分的熔接),再将特种光纤一端的部分涂覆层剥去,并将端面切平后插入空心光纤。对接口处滴加光纤胶密封处理,并用紫外固化灯进行固化。进而可制成不同浓度和不同长度的 QDF。在将 QDF 接入谐振腔之前,采用截断法,即在 QDF 上靠近抽运光输入端处,对抽运光耦合效率及最大入纤功率进行测量。

实验首先采用 AQ6317C 型近红外光谱仪(精度为 0.01 nm)对不同长度和浓度下 QDF 的 PL 谱进行测量,初步确定荧光辐射强度与光纤长度和掺杂浓度



之间的关系。采用康宁公司生产的 S46999-M7-A76 型光纤熔接机,将不同浓度、不同长度的 QDF 分别熔接入谐振腔光路中。采用 Newport1918-C 型功率计对激光器的输出功率进行测量,确定输出功率与抽运功率、掺杂浓度、光纤长度及耦合比的关系。本实验使用的 QDF 为多模光纤,激光光谱特性较差,因此,采用光纤弯曲选模的方法,即将 QDF 缠绕在一定直径的圆柱体上,对激光模式进行选模,消除高阶模,留下基模。采用 AQ6317C 型近红外光谱仪测量激光器的输出光谱特性,可对不同光纤长度、不同掺杂浓度以及有/无光纤弯曲缠绕的情形分别进行测量。

3 实验结果与分析

实验用的 PbSe 量子点由青岛星汉纳米技术有限公司采用胶体合成法制备得到。实测量子点的透射电镜(TEM)图和不同掺杂浓度下的 X 射线衍射(XRD)图如图 2 所示。图 2(a)中黑色为 PbSe 量子点,在粒子内部有较明显的单晶结构。PbSe 量子点属于 IV-VI 族岩盐单畴半导体纳米晶体粒子^[11],由图 2(b)可见,量子点在多个晶面出现了衍射峰,不同浓度量子点的 XRD 峰强度不同。

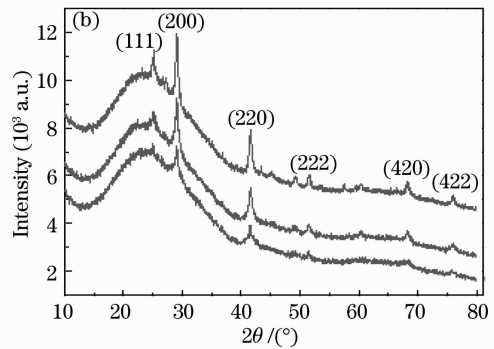


图 2 实验采用的 PbSe 量子点的(a) TEM 图和(b) XRD 图

Fig. 2 (a) TEM micrograph and (b) XRD pattern of PbSe QDs used in the experiment

经过多次实验研究,本实验采用的量子点掺杂浓度范围 c 为 2~10 mg/mL。已知 PbSe 的质量密度为 8.1 g/cm³,量子点直径为 5.2 nm,假设量子点为球形,经简单计算可知,每量子点的质量 $m = 5.96 \times 10^{-16}$ mg。于是,实验的量子点数密度范围为 $N_q = c/m = (0.34 \sim 1.68) \times 10^{16}$ cm⁻³,该浓度范围在激励阈值浓度附近^[12-13],从而可较好地观测激光情况。

图 3 为实测的 PbSe 量子点的近红外吸收和 PL

谱以及 UV 胶本底近红外吸收谱。由图 2(a)可知量子点的尺寸在 5~5.5 nm 之间。由修正的 Brus 方程^[14]及图 3(a),可进一步确定量子点的直径约为 5.2 nm。由图 3(b)可见,UV 胶在近红外吸收很小,因此,近红外抽运光的能量几乎可全部被光纤中的 PbSe 量子点吸收,这是本文采用 UV 胶的优点之一。此外,由于 UV 胶的折射率略大于普通光纤包层 SiO₂ 的折射率(使得光在纤芯中可产生全反射),易于固化,操作方便,使实验容易成功。

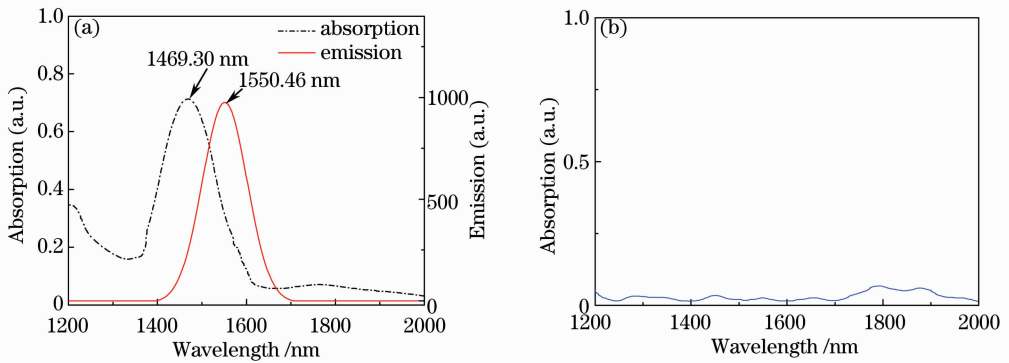


图 3 (a) PbSe 量子点的吸收和发射谱; (b) UV 胶本底吸收率

Fig. 3 (a) Emission and absorption spectra of PbSe QD; (b) absorption of UV adhesive

量子点的第一吸收峰和 PL 峰分别位于 1469.30 nm 和 1550.46 nm 处,两者波长间隔(斯托克斯频移)为 81.16 nm。之前的实验研究表明^[9]:直径为 5.5 nm 的 PbSe 量子点,其吸收和 PL 发射峰值波长分别位于 1550 nm 和 1630 nm 处。对比图 3,发现随着量子点半径 r 的变化,量子点的辐射波长表现出明显的尺寸依赖(正比于 r^3),其规律与相关文献^[13]的报道一致。此外,由于这里量子点的尺寸极小(5.2 nm),远小于其玻尔半径(46 nm^[9]),量子限域效应明显,产生的激子出现强吸收现象,进而导致如图 3 所示的近红外波带的强吸收。正是这种在短波长区的连续强吸收,在实验上给激励量子点的抽运波长的选择带来了极大的方便,这是用纳米晶体量子点来构成增益型器件的优点之一。

如图 4 所示,在将 QDF 接入谐振腔之前,测量了不同长度 QDF 抽运光的吸收情况。在掺杂浓度为 2~10 mg/mL、光纤长度为 10~150 cm 的实验范围内,发现随着掺杂浓度的变化,抽运功率呈现 0.06~0.13 dB/cm 大小的指数衰减。注意到,当浓度为 10 mg/mL,光纤长度达到一定值(如 85 cm)时,抽运光几乎被全部吸收。此外还发现,由于量子点沿光纤的分布吸收,使得浓度越高,吸收越强,抽运光衰减越快,这也可解释其功率随光纤长度的增加而呈现饱和的现象。

测量了不同掺杂浓度下 QDF 荧光辐射光强随光纤长度的变化,如图 5 所示。在掺杂浓度为 2~10 mg/mL、光纤长度为 40~160 cm 的实验范围内,发现最大 PL 峰对应的掺杂浓度为 10 mg/mL、光纤长度为 85 cm。此外,假设图 5(a)满足指数衰减,且下降到峰值功率的 e^{-1} 时,由计算可得到衰减率为 0.06~0.13 dB/cm,略低于 980 nm 抽运光的吸收

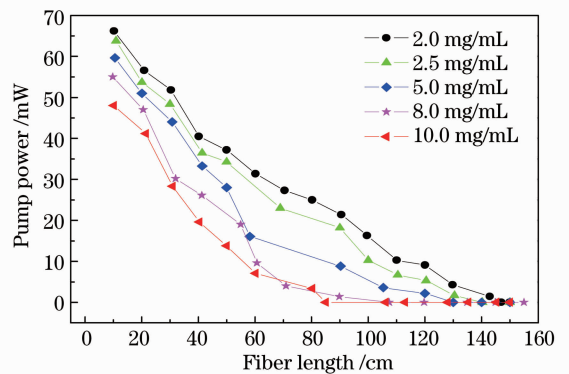


图 4 抽运光功率随光纤长度的变化

Fig. 4 Measured pump power as a function of fiber length

率,与传统的掺铒光纤吸收速率(约 0.1 dB/cm)相近。

其次,还对耦合比在 0%~100% 范围内的激光器输出功率进行了实验测量。结果得到最佳耦合比为(80%~90%):(20%~10%)(输出激光与 FBG 反射的比率)。

根据以上实验结果,选择掺杂浓度为 10 mg/mL(根据最大 PL 峰值)、QDF 长度为 85 cm、输出耦合比为 90%:10%和实际入纤抽运功率 68 mW(如图 1,在 A 点测量)作为进一步实验的标准条件。

在大模场光纤中,存在各种高阶模,实验观测到的是各个模的叠加。为了消除高阶模,采用光纤弯绕选模法,即将多模的 QDF 均匀缠绕在圆柱体上,圆柱体的直径为 16 mm。采用功率计结合衰减片,在 QDF 输出末端对其横断面的光场强度分布进行测量(测量位置在图 1 中 B 点)。图 6 为光纤缠绕前后光场强度的对比,显然,无弯曲缠绕的光场是多个模式的叠加。光纤经弯曲缠绕选模后,激光输出光场呈近单模的高斯分布,与无弯曲缠绕时的多模情

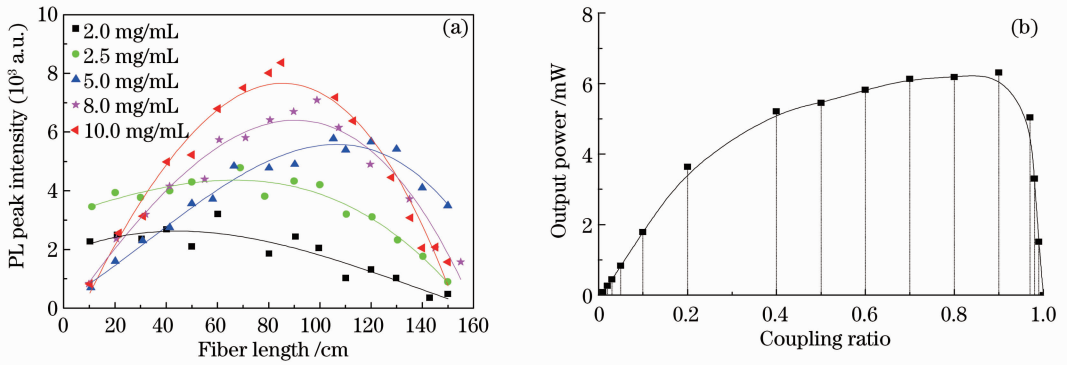


图 5 (a)不同掺杂浓度下 QDF 荧光辐射光强随光纤长度的变化;(b)激光器输出功率随耦合比的变化

Fig. 5 (a) PL peak intensity as a function of fiber length and doping concentration; (b) output power as a function of coupling ratio

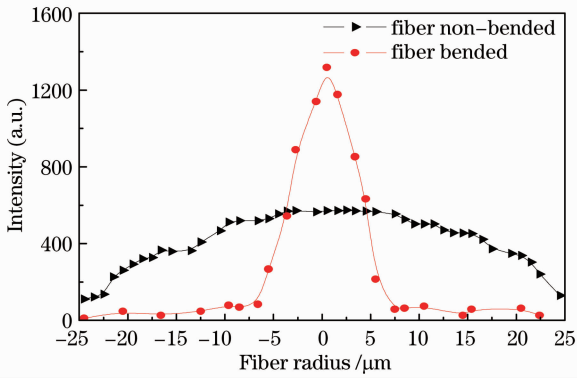


图 6 光纤无弯曲和有弯曲时输出端横模场的测量

Fig. 6 Transverse optical field measured at output end for fiber non-bent and bent

况有很大的不同。由此可近似认为经弯曲缠绕得到的激光为单横模输出。

图 7 (a) ~ (c) 为在不同抽运功率 (10、25、68 mW) 条件下得到的增益谱。可以发现, 当抽运功率为 10 mW 时, 在 1550 nm 附近几乎没有光出现。当抽运功率为 25 mW 时, 出现 0.1 dBm 的激光功率峰值。在标准条件下 (抽运功率为 68 mW), 在中心波长 1550.46 nm 处, 出现了 6.1 dBm 的峰

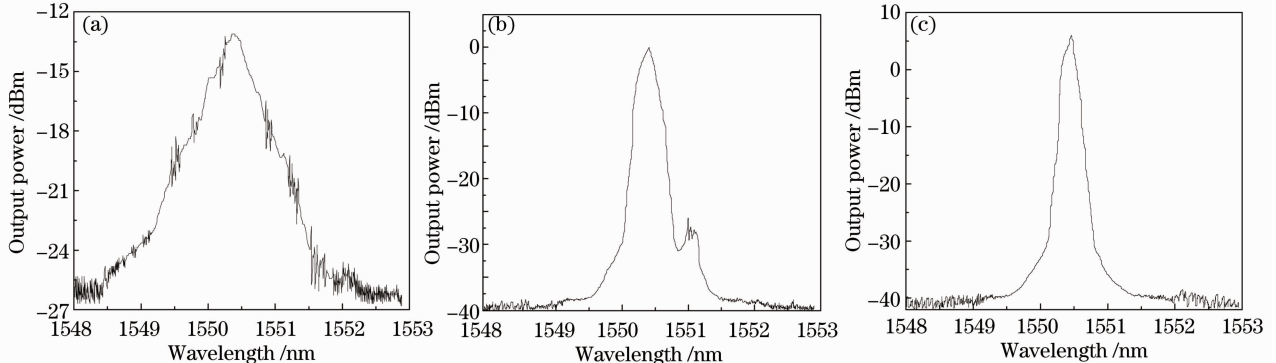


图 7 入纤抽运功率为(a) 10 mW, (b) 25 mW, (c) 68 mW 时的激光功率增益谱

Fig. 7 Measured lasing gain spectra for input pump power of (a) 10 mW, (b) 25 mW and (c) 68 mW

值功率。光谱的 -3 dB 带宽小于 0.1 nm, 边模抑制比约为 47 dB。在 2 h 的连续观察时间内, 波长漂移小于 0.02 nm, 无跳模现象发生。

在上述条件下, 经多次不定时测量, 输出的平均激光功率随入纤抽运功率的变化如图 8 所示, 图中给出了有/无光纤弯曲缠绕的两种情形。由图可见, 当抽运功率很小时, 几乎没有激光输出; 当入纤抽运功率增大到某一值 (例如 25 mW) 时, 输出功率突然出现, 并随抽运功率线性增大。该抽运功率可看成是阈值功率。对于有光纤弯曲缠绕的情形 (单模输出), 当入纤抽运功率为 68 mW 时, 实验测得的最大激光输出功率为 6.31 mW, 抽运效率为 9.3%。而无弯曲缠绕时 (多模输出), 测得最大功率达 19.20 mW, 抽运效率为 28.2%。有弯曲缠绕时, 激励阈值比无弯曲缠绕时增大了, 抽运效率下降, 显然, 光纤的弯曲导致了光纤损耗增大。

对于激励阈值功率, 由于观测到的辐射峰为单峰, 可采用简单的二能级近似来估计。在二能级系统中, 抽运阈值功率为^[15]

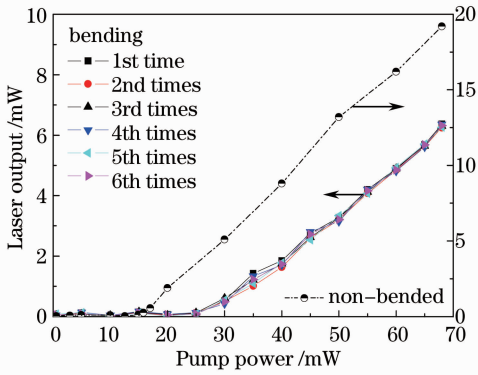


图 8 输出功率随抽运功率的变化

Fig. 8 Output power versus pump power

$$P_{th} = \frac{\sigma_{a,L} h \nu_P A}{\Gamma_P \tau (\sigma_{a,P} \sigma_{e,L} - \sigma_{e,P} \sigma_{a,L})}, \quad (1)$$

式中 σ 为截面, ν_P 为抽运频率, Γ_P 为抽运光重叠因子, τ 为激光上能级寿命, A 为纤芯面积, h 为普朗克常数, 下角标 a 表示吸收, e 为辐射, P 为抽运, L 为激光。对于 50 μm 直径的 QDF, 980 nm 抽运, 由已知 PbSe 量子点的吸收截面和辐射截面^[9]、上能级寿命^[16], 取抽运光的重叠因子 $\Gamma_P = 0.3$, 由(1)式可得抽运阈值功率 P_{th} 为 22~28 mW, 该阈值与图 8 实验测量的阈值相当接近。根据数量级的估计, 该结果比较合理。

图 9 为测量的激光输出功率随光纤长度变化的饱和特性。实验发现, 对于不同的掺杂浓度, 饱和功率相同, 但饱和光纤长度不同。浓度越高, 饱和长度越短; 浓度越低, 饱和长度越长。由于 PbSe 量子点的吸收截面很大, 峰值截面达到了 10^{-20} cm^{-2} ^[9], 比天然的铟离子的吸收截面大 4~5 个量级, 因此, 当抽运光沿光纤传播时, 由于吸收很大而使得抽运光强很快下降 (参照图 4), 从而使得激射无法再从抽

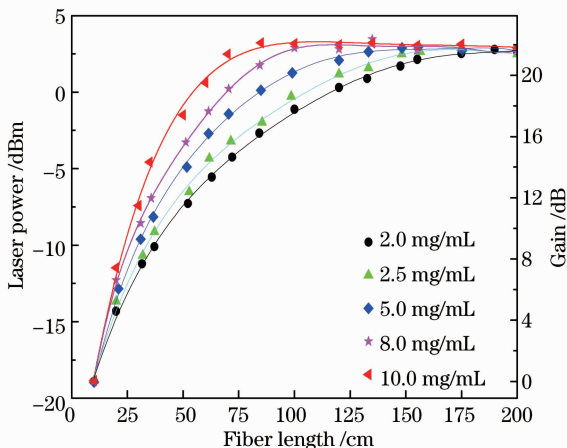


图 9 激光功率随光纤长度变化

Fig. 9 Measured laser power as a function of fiber length

运光中吸收能量而达到饱和, 其饱和光纤长度比通常的掺铟光纤激光器短了许多。对于 QDFL 的更详尽的饱和特性以及最大的激光功率等, 有待进一步实验和理论探究。

4 结 论

以 PbSe 量子点作为光纤中的激活增益介质, 在 980 nm LD 的抽运下, 在全光纤环形谐振腔中, 实现了波长为 1550 nm、稳定连续的激光振荡。在单模输出情况下, 抽运的激励阈值为 25 mW。高于激励阈值时, 激光输出功率随激励功率呈线性增大。在入纤抽运功率为 68 mW 的情况下, 得到单模输出功率为 6.31 mW, 3 dB 线宽小于 0.1 nm, 斜率效率为 14.9% 的激光输出; 多模输出功率达到 19.20 mW。激光波长取决于 FBG 以及量子点的辐射峰值波长。改变 FBG 的中心波长以及量子点的粒径, 可以调整输出的激光波长。由于量子点在短波长区具有连续强吸收, 因此, 抽运波长的可选范围很大。

本文的工作是以 PbSe 纳米晶体量子点作为激活增益介质, 在全光纤谐振腔中观测到激射行为的首次实验报道, 对形成新型的纳米晶体量子点激光器是一次有益的尝试。由于激光功率与量子点的掺杂浓度、光纤长度、抽运功率和波长、输出耦合比等许多参量有关, 本文没有对这些参量进行优化, 主要关注于 PbSe 量子点光纤激光的首次实验实现。PbSe 量子点激光器性能的提高及其可能的饱和特性研究, 有待于今后进一步的工作。

参 考 文 献

- 1 T C Harman, P J Taylor, M P Walsh, *et al.*. Quantum dot superlattice thermoelectric materials and devices [J]. *Science*, 2002, 279(5590): 2229-2232.
- 2 Z F Wang, Q W Shi, Q X Li, *et al.*. Z-shaped graphene nanoribbon quantum dot device [J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 91(5): 053109.
- 3 Q Darugar, W Qian, M A El-Sayed. Observation of optical gain in solutions of CdS quantum dots at room temperature in the blue region [J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 88(26): 261108.
- 4 O Masakazu, M Yoneta, K Takeuchi, *et al.*. Photoluminescence of CdSe quantum dots grown on tilted ZnSe/GaAs [J]. *Phys Status Solid (c)*, 2004, 1(4): 763-766.
- 5 M Fill, A Khair, M Rahim, *et al.*. PbSe quantum well mid-infrared vertical external cavity surface emitting laser on Si-substrates [J]. *J Appl Phys*, 2011, 109(9): 093101.
- 6 A A Antipov, S M Arakelyan, S P Zimin, *et al.*. CW laser-induced generation of periodic ring structures on thin PbSe films [J]. *Quantum Electron*, 2011, 41(5): 441-446.
- 7 Cheng Cheng, Jiang Huilü, 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 量子点纳硼铝硅酸盐玻璃[J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0216005.
- 8 Xu Zhousu, Cheng Cheng, Ma Dewei. Preparation and optical characterization of PbSe quantum dot-doped silicate glass with high concentration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0916002.
- 许周速, 程 成, 马德伟. 较高浓度 PbSe 量子点硅酸盐玻璃的制备及光学表征[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0916002.
- 9 C Cheng. A multi-quantum-dot-doped fiber amplifier with characteristics of broadband, flat gain and low noise [J]. *J Lightwave Technol*, 2008, 26(11): 1404–1410.
- 10 C Cheng, K H Wei, X Y Cheng. A simulation of PbSe quantum dot-doped fiber laser [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim*, 2009, ThA2.
- 11 W W Yu, J C Falkner, B S Shih, *et al.*. Preparation and characterization of monodisperse PbSe semiconductor nanocrystals in a noncoordinating solvent [J]. *Chem Mater*, 2004, 16(17): 3318–3322.
- 12 V I Klimov, A A Mikhailovsky, S Xu, *et al.*. Optical gain and stimulated emission in nanocrystal quantum dots [J]. *Science*, 2000, 290(5490): 314–317.
- 13 V I Klimov. Mechanisms for photogeneration and recombination of multiexcitons in semiconductor, nanocrystals; implications for lasing and solar energy conversion [J]. *J Phys Chem B*, 2006, 110(34): 16827–16845.
- 14 B Pejova, I Grozdanov. Three-dimensional confinement effects in semiconducting zinc selenide quantum dots deposited in thin-film form [J]. *Mater Chem and Phys*, 2005, 90(1): 35–46.
- 15 P C Becker, N A Olsson, J R Simpson. *Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology* [M]. San Diego: Academic Press, 1999. 147.
- 16 H Du, C Chen, R Krishnan, *et al.*. Optical properties of colloidal PbSe nanocrystals [J]. *Nano Lett*, 2002, 2(11): 1321–1324.

栏目编辑: 宋梅梅