

基于钠硼铝硅酸盐玻璃的 PbSe 量子点 红外单模光纤激光

程 成 赵志远*

(浙江工业大学光电子智能化技术研究所, 浙江 杭州 310023)

摘要 根据实验制备的钠硼铝硅酸盐 PbSe 量子点玻璃及其透射电子显微镜(TEM)图、吸收谱和发射谱, 计算机数值模拟了以 PbSe 量子点作为激活增益介质的红外单模光纤激光。应用遗传算法, 通过数值求解粒子数速率方程和激光谐振腔振荡方程, 优化计算了量子点光纤激光器(QDFL)的最佳抽运波长、光纤长度、掺杂浓度及出射镜反射率。结果表明: 饱和抽运功率为 2 W, 在 1676 nm 激光波长处, QDFL 最大输出功率可达 1.36 W, 抽运效率达 68%。与通常的掺稀土离子(Yb^{3+} 、 Er^{3+})的光纤激光器相比, QDFL 具有抽运效率高、激励阈值低、掺杂密度可调、光纤饱和长度短等特点。由于量子点辐射波长的尺寸依赖特性, 容易形成多波长激光或波长可调的新型激光器。

关键词 激光器; PbSe 量子点; 截面; 神经网络; 遗传算法

中图分类号 TN244

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201232.0914002

A Single-Mode Infrared Fiber Laser Based on Sodium-Boron-Aluminosilicate Glass Doped with PbSe Quantum Dots

Cheng Cheng Zhao Zhiyuan

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

Abstract A single mode infrared (IR) fiber laser using PbSe quantum dots as active medium is proposed according to the observed transmission electron microscope (TEM) images, absorption and emission spectra of the sodium-boron-aluminosilicate glass doped with PbSe quantum dots prepared before. The rate equations and lasing oscillation equation in a resonator are solved numerically. The optimal pumping wavelength, fiber length, doping concentration and reflectance of output mirror are obtained by using genetic algorithm. There is evidence that the quantum dots fiber laser (QDFL) possesses the saturated pumping power of 2 W, the maximum output of 1.36 W for 1676 nm lasing wavelength, and the pumping efficiency of 68%. Compared with the conventional fiber lasers that are doped with rare earth ions (e. g. Yb^{3+} , Er^{3+}), QDFL has characteristics of high pumping efficiency, low exciting threshold, adjustable doping density, and short saturated fiber length. The proposed QDFL can be developed into a novel multi-wavelength and wavelength-tunable laser due to lasing wavelength depending on the size of quantum dots.

Key words lasers; PbSe quantum dot; cross section; neural network; genetic algorithm

OCIS codes 140.3510; 140.3380; 060.3510; 060.2290

1 引 言

半导体纳米晶体(量子点)由于其电子和空穴的三维受限运动, 导致其能级和光谱的离散化, 荧光辐射比体材料明显增强, 展现出一些独特的光学、光谱和光电特性, 吸引了人们的极大关注^[1,2]。

近年来, 随着量子点制备研究的不断发展, 人们已经开始研究利用量子点独特的光学特性, 来构成一些新颖的光电子器件, 例如: 量子点发光二极管(LED)、量子点太阳能电池、量子点光纤^[3,4]和量子点光纤放大器^[5,6]等。目前报道的量子点主要由

收稿日期: 2012-03-28; 收到修改稿日期: 2012-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(60777023)和浙江省公益技术应用研究(2011C21047)资助课题。

作者简介: 程 成(1953—), 男, 博士, 教授, 主要从事纳米晶体量子点光纤、量子点光纤放大器、量子点光纤激光器等方面的研究。E-mail: chengch@zjut.edu.cn(中国光学学会会员号: S040421054S)

* 通信联系人。E-mail: zhaozhiyuan_977@126.com

II-VI族(例如 CdSe、CdS、ZnSe 等)、III-V 族(例如 GaAs、InP、InAs 等)和 IV-VI 族(例如 PbS、PbSe 等)组成。对于红外波段,实验表明,PbSe 量子点的辐射波长位于常规光通信波段 1550 nm 附近,量子产率极高(约为 700%^[7]),荧光辐射很强。例如,文献[6,8]等报道了掺 PbSe 量子点的光纤放大器可以在 L 波段(1570~1620 nm)工作,比常规的掺铒光纤放大器的带宽更宽、噪声更低等。

在前期的研究中,使用本体聚合法制备了聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)为基底的 PbSe 量子点^[9]以及用高温熔融法成功制备了 PbSe 量子点掺杂的钠硼铝硅酸盐玻璃,玻璃中的量子点直径为 4~10 nm,数密度约为 10^{22} m^{-3} ,并在实验室中拉制成了量子点玻璃光纤^[10]。利用上述实验结果,通过数值计算,来进一步研究实现基于钠硼铝硅酸盐玻璃的 PbSe 量子点激光振荡的可能性。首先,根据玻璃中的 PbSe 量子点的吸收光谱和荧光光谱,确定了 PbSe 量子点的吸收截面和辐射截面,由实测 207~1240 nm 波段的吸收截面,用神经网络法推出了 1240~2230 nm 波段的吸收截面。然后,根据测量的光谱,建立了 PbSe 量子点的激光能级模型,数值求解了线性谐振腔中的激光能级粒子数速率方程和激光振荡方程。最后,在给定抽运

功率的情况下,用遗传算法,以激光输出功率为目标函数,对激光的工作参数(抽运波长、光纤长度、量子点掺杂浓度和出射镜反射率)进行了优化,得到了激光器的最优工作参数。

该工作对实验室研制 PbSe 量子点光纤激光器具有指导意义,同时,也为今后研究其他种类的量子点光纤激光器(QDFL)提供了思路和方法。

2 PbSe 量子点的吸收谱和发射谱

用高温熔融法制备了掺 PbSe 量子点的钠硼铝硅酸盐玻璃^[10],其透射电子显微镜(TEM)图如图 1 所示,吸收谱和发射谱如图 2 所示,其中热处理温度分别为 550 °C[图 2(a)]、600 °C[图 2(b)],插图为各自的归一化吸收谱和辐射谱,其中发射谱中的尖峰为激发波长的二倍峰。图 2(a)中,PbSe 量子点的第一吸收峰和发射峰波长分别为 1566 nm 和 1676 nm;图 2(b)中,第一吸收峰和发射峰波长分别为 2190 nm 和 2210 nm。由 Brus 公式^[11]可知,PbSe 量子点的平均尺寸分别为 6 nm[图 2(a)]和 9 nm[图 2(b)]。

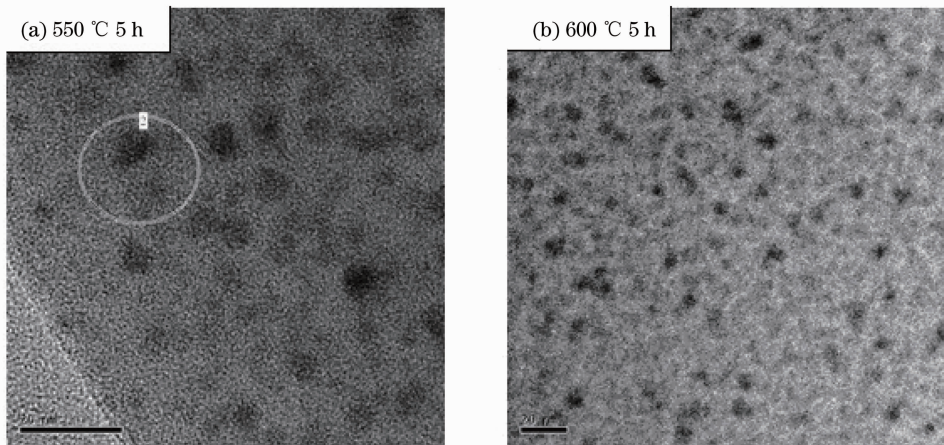


图 1 (a) 550 °C 和(b) 600 °C 热处理后 PbSe 量子点玻璃的 TEM 图^[10]

Fig. 1 TEM image of PbSe quantum dots glass with heat-treatment temperature at (a) 550 °C and (b) 600 °C

由图 2 可知发射峰为单峰,即辐射跃迁只在两个能级之间进行,于是,可以得到 PbSe 量子点的能级跃迁如图 3 所示。图中能级 1 表示基态,能级 2 包含有精细结构,其间隔对应于图 2 中的吸收峰和发射峰之间的波长间隔。能级 3 为导带(CB),对应于图 2 中短波长区的连续吸收。

在短波长抽运光的作用下,量子点吸收抽运能量后,被激发到导带能级 2 和 3(过程用虚线表示)。

能级 2 的粒子通过受激辐射和自发辐射直接跃迁回价带(VB,基态),同时辐射出一个辐射峰波长的光子。导带能级 3 的粒子通过热碰撞,以几率 A_{32} 无辐射弛豫到能级 2,再辐射跃迁回基态,形成单峰辐射。量子点的这种辐射谱特征来自于它的量子限域效应,能级 3 到 2 为导带内的热碰撞弛豫,跃迁几率非常大(约为 4 ps^[12]),因此,能级 3 的粒子很快弛豫到能级 2,导致 PbSe 量子点的三能级系统蜕化为

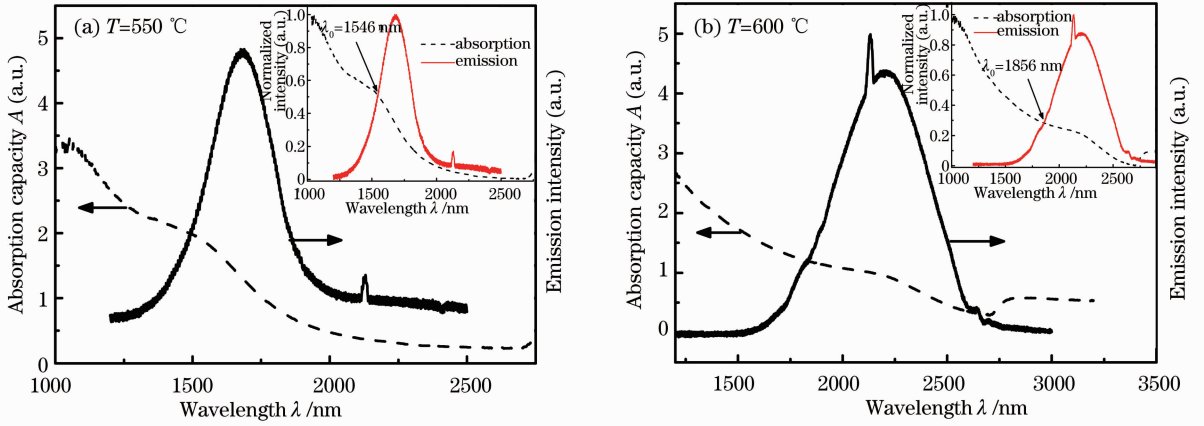


图 2 在热处理温度(a) 550 °C; (b) 600 °C^[10]时实测的 PbSe 量子点的吸收和发射谱图。插图为各自的归一化吸收谱和发射谱
Fig. 2 Absorption and emission spectra of the PbSe quantum dots after heating treatment at (a) 550 °C and (b) 600 °C, the insets are the normalized absorption and emission spectra, respectively

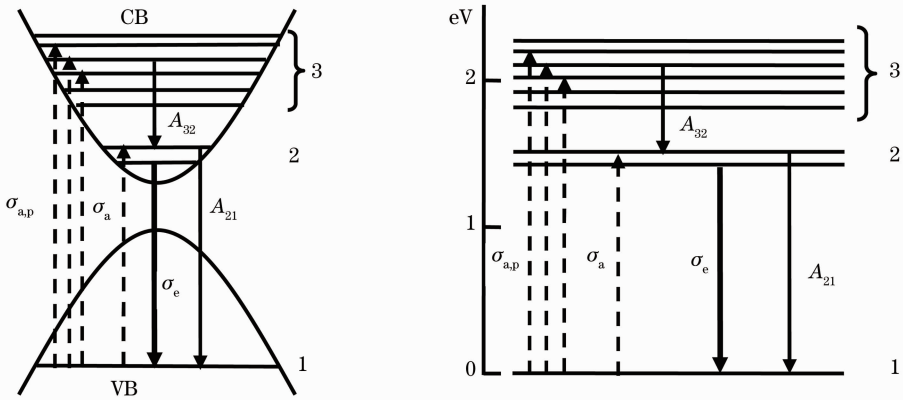


图 3 PbSe 量子点的能级图

Fig. 3 Energy-level diagram of PbSe quantum dots

二能级系统。因此,本文用二能级系统来表示 PbSe 量子点。

3 散射截面和吸收截面

量子点的吸收和发射截面是表征其光学性能的重要参量,它们对量子点的激光行为有着举足轻重的影响。对于 CdTe、CdSe、CdT 量子点,人们已经通过实验测量了它们的吸收截面,并归纳得到了一些经验公式^[13]。对于发射截面,在热平衡条件下,可以通过 Mc Cumber 关系^[14]来确定。下面,用两种方法来估计 PbSe 量子点的吸收和发射截面。

3.1 根据实测光谱估算截面

在均匀介质中,光强的变化可表达为

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda)d], \quad (1)$$

式中 d 为光穿过介质的长度。

量子点的吸收截面可表达为

$$\sigma_a(\lambda) = \frac{\alpha(\lambda)}{N_p} = \frac{A(\lambda)/d}{N_p}, \quad (2)$$

式中 N_p 为介质中的量子点数密度, A 为随波长变化的吸收本领。

由 Mc Cumber 关系^[14],可知量子点的发射截面为

$$\sigma_e(\lambda) = \sigma_a(\lambda) \exp\left[\frac{hc}{kT}\left(\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda}\right)\right], \quad (3)$$

式中 λ_0 为归一化辐射强度与吸收强度相等时所对应的波长, k 为玻尔兹曼常数, T 为温度。注意到吸收截面和发射截面都是波长的函数。

由图 1 可知, PbSe 量子点的数密度分别为 $N_p = 6.04 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ [图 1(a)] 和 $N_p = 3.35 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ [图 1(b)]。已知实测样品的厚度 $d = 1 \text{ mm}$, 于是,由所测样品的吸收本领 A (图 2) 及 (2) 式可确定吸收截面。对于实测的吸收峰值波长 $\lambda = 1566 \text{ nm}, 2190 \text{ nm}$, 于是,吸收截面 σ_a 分别为 $2.98 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ 和 $2.86 \times 10^{-20} \text{ m}^2$ 。

3.2 由神经网络法估算截面

在米氏(Mie)散射理论中,当散射体的尺寸远小于入射波长时,散射为瑞利散射。瑞利散射的散

射截面远小于吸收截面,因而散射可忽略,消光截面就等于吸收截面。下面主要考虑吸收。散射体的吸收截面为^[5,15]

$$\sigma_a = 4\pi r_q^2 x \text{Im} \left[\frac{n_{\text{back}}^2}{\tilde{\epsilon}_{\text{back}}} \frac{\tilde{m}^2 - 1}{\tilde{m}^2 + 2} \left(1 + \frac{x^2}{15} \frac{\tilde{m}^2 - 1}{\tilde{m}^2 + 2} \frac{\tilde{m}^4 + 27\tilde{m}^2 + 38}{2\tilde{m}^2 + 3} \right) \right], \quad (4)$$

式中 r_q 为散射体(量子点)的半径, $x \equiv n_{\text{back}} k_{\text{vac}} r_q$ (n_{back} 为背景材料复介电系数 $\tilde{\epsilon}_{\text{back}}$ 的实部, k_{vac} 为真空中的波数), Im 为虚部符号, $\tilde{m} \equiv \frac{\tilde{\epsilon}_q}{\tilde{\epsilon}_{\text{back}}}$ ($\tilde{\epsilon}_q$ 为散射体的复介电系数)。散射体和背景的复介电系数可写为 $\tilde{\epsilon} = n + i\alpha$ (其中 n 为折射率, α 为吸收率或吸收本领)。

对于以钠硼铝硅酸盐玻璃为背景的 PbSe 量子点的复介电系数,当掺杂体积比 η 很小时(例如 $\eta < 1\%$),背景材料(钠硼铝硅酸盐玻璃)介电系数的影响可以忽略^[15],即 $\tilde{\epsilon}_{\text{back}} = n_{\text{back}}$,因此吸收截面只与散射体(量子点)的复介电系数有关。然而,目前人们只给出了波长为 207~1240 nm 范围中的 PbSe 的折射率和吸收率^[16]。在更宽的波长区(例如 1240~2330 nm),其折射率和吸收率尚没有相关数据。

为了克服不足,利用 Matlab 神经网络法和已有波带内的复介电系数,来推出 1240~2330 nm 波带中 PbSe 量子点的折射率和吸收率。根据(4)式,就可以得到该波长范围中的吸收截面,从而可以跟 3.1 中的实验测量的截面进行对比。

创建一个三层反向传播(BP)神经网络,并根据已有波长范围中的复介电系数,对网络进行训练与

测试。利用训练后的网络对已知数据进行检测,并与实验数据进行对照分析,最后的结果如图 4 所示。从图 4 可以得到 PbSe 量子点复折射率的实部 n_q (折射率)和虚部 α_q (吸收率)。经测试,最大相对误差分别为 0.67% 和 5.97%。然后,根据(4)式,得到直径为 5~9 nm 的 PbSe 量子点在 207~2230 nm 宽波长范围中的吸收截面,如图 5 所示。

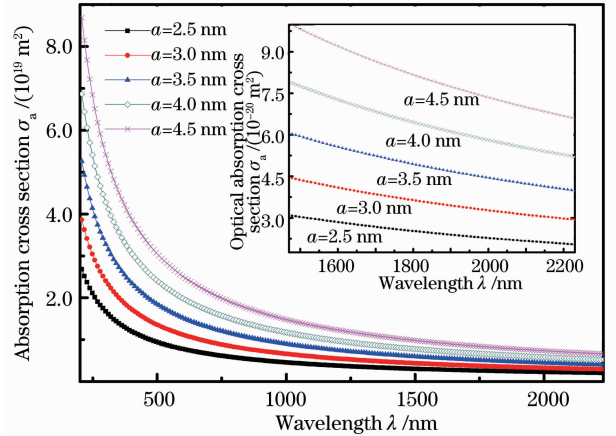


图 5 钠硼铝硅酸盐玻璃中的 PbSe 量子点的吸收截面
Fig. 5 Absorption cross-section of PbSe quantum dots in the sodium-boron-alumin silicate glass

由图 5 可见,1400~2230 nm 波长范围内(量子点半径为 2.5~4.5 nm),PbSe 量子点的吸收截面为 $\sigma_a = (2.0 \sim 9.7) \times 10^{-20} \text{ m}^2$ 。为了进一步了解所得到的截面的准确性,表 1 给出了与 3.1 节中根据实验得到的结果的比较。

表 1 PbSe 量子点吸收截面 σ_a 的实测值与神经网络预测值的比较

Table 1 Comparison of the absorption cross-section of PbSe quantum dots between the calculation and the neural network prediction

Wavelength λ/nm	Diameter of quantum dots D/nm	Measured σ_a/m^2	Predicted σ_a/m^2
1566	6	2.98×10^{-20}	6.71×10^{-20}
2190	9	2.86×10^{-20}	4.17×10^{-20}

如果考虑 3.1 节中的实验误差(光路长度以及数密度)和神经网络推测本身的误差,这两种方法得到的截面应当进一步靠近。

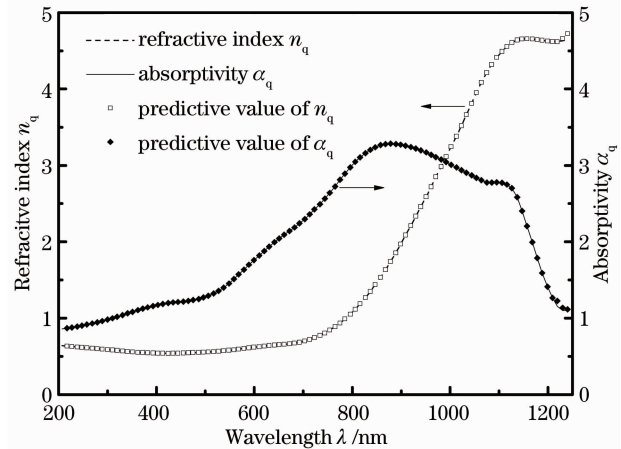


图 4 PbSe 量子点的复介电系数的神经网络测试和实验对比

Fig. 4 Comparison of the complex dielectric coefficient of PbSe quantum dots between the neural network test and the experimental measurement

4 PbSe 量子点激光器参量的确定

4.1 速率方程及边界条件

在二能级系统中,忽略稳态时自发辐射的贡献

$$\frac{N_2(z)}{N} = \frac{\frac{\sigma_{a,p}\Gamma_p\lambda_p P_p(z)}{hcA} + \frac{\sigma_{a,L}\Gamma_L\lambda_L[P_L^+(z) + P_L^-(z)]}{hcA}}{\frac{(\sigma_{a,p} + \sigma_{e,p})\Gamma_p\lambda_p P_p(z)}{hcA} + \frac{1}{\tau} + \frac{(\sigma_{a,L} + \sigma_{e,L})\Gamma_L\lambda_L[P_L^+(z) + P_L^-(z)]}{hcA}}, \quad (5)$$

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -\Gamma_p[\sigma_{a,p}N - (\sigma_{a,p} + \sigma_{e,p})N_2(z)]P_p(z) - \alpha_p P_p(z), \quad (6)$$

$$\pm \frac{dP_L^\pm(z)}{dz} = \Gamma_L[(\sigma_{a,L} + \sigma_{e,L})N_2(z) - \sigma_{a,L}N]P_L^\pm(z), \quad (7)$$

式中 N_2 为上能级粒子数密度(粒子数满足守恒定则 $N = N_1 + N_2$), $P(z)$ 为在光纤 z 处的激光功率, λ 为波长, σ 为截面, c 为光速, h 为普朗克常数, 下角标 p, L 分别表示抽运光和激光, 下角标 a, e 分别表示吸收及发射, 上角标 \pm 表示沿光纤 z 轴正或反方向传播, 其余参数的意义如表 2 及表 3 所示。

表 2 数值优化计算所需的各参数值

Table 2 Parameter involved in the optimized simulation

Parameter	Value
Pump wavelength /nm	1064
Pumping absorption cross section $\sigma_{a,p}/m^2$	3.54×10^{-20}
Pumping emission cross section $\sigma_{e,p}/m^2$	1.20×10^{-20}
Lifetime τ /ns	300 ^[5]
Radius of single-mode fiber core a / μm	4.1
Background loss (for pump) α_p/m^{-1}	3×10^{-3}
Laser wavelength λ_L /nm	1676
Reflectivity of former cavity mirror R_1	0.98
Pump coupling factor Γ_p	0.1
Laser coupling factor Γ_L	0.76
Laser absorption cross section $\sigma_{a,L}/m^2$ ($\lambda=1566$ nm)	2.98×10^{-20}
Laser emission cross section $\sigma_{e,L}/m^2$ ($\lambda=1676$ nm)	3.31×10^{-19}

Notes: the calculation of coupling factor is shown in appendix.

表 3 待优化参数值的搜索范围

Table 3 Searching range of parameter to be optimized

Parameter	Value
Pump wavelength λ_p /nm	900~1600
Doping concentration N / m^{-3}	$1 \times 10^{19} \sim 1 \times 10^{24}$
Fiber length L /m	0.1~10
Reflectivity of outgoing mirror R_2	0.1~1.0

设激光器的光纤长度为 L , 由法布里-珀罗干涉腔(FBG)构成谐振腔, 反射镜的反射率为 R_1 , 出射

以及散射损耗^[17,18], 稳态时激光能级的粒子数速率方程和激光功率方程分别为^[19]

镜的反射率为 R_2 , 则稳态时光纤激光器的边界(端面)条件满足

$$\begin{cases} P_L^+(0) = R_1 P_L^-(0) \\ P_L^-(L) = R_2 P_L^+(L) \end{cases}. \quad (8)$$

4.2 激光输出功率的优化

输出功率是激光器的一个重要指标。在(8)式的边界(端面)条件下, 数值求解(5)~(7)式, 可得到抽运光功率和激励产生的激光功率沿光纤轴向的变化, 即 $P_p(z)$ 和 $P_L^\pm(z)$, 从而可得到激光器的输出功率:

$$P_{out} = (1 - R_2)P_L^+(L). \quad (9)$$

由(5)~(9)式可知, 激光输出功率 P_{out} 为抽运波长 λ_p 、量子点掺杂浓度 N 、光纤长度 L 、出射镜反射率 R_2 的函数, 即 $P_{out} = P_{out}(\lambda_p, N, L, R_2)$ 。为了得到最大的激光输出功率, 采用遗传算法来确定这 4 个参量 λ_p, N, L, R_2 的最佳值。具体算法如下:

激光振荡波长选为量子点的辐射峰值波长 $\lambda_L = 1676$ nm。以(9)式的激光器输出功率 P_{out} 为目标函数, 取抽运波长 λ_p 、掺杂浓度 N 、光纤长度 L 、出射镜反射率 R_2 为 4 个待优化参数(基因), 对(5)~(7)式进行数值计算。依据目标函数值, 对染色体进行排序、基因交叉、选择和突变等遗传算子的运算, 得到最佳的 λ_p, N, L, R_2 。遗传算法的具体程序可见文献[20]。计算所需的各参数列于表 2 中, 待优化参数的变化范围如表 3 所示。

首先, 在除优化参数以外其余参数不变的条件 下, 尝试用不同的抽运功率 P_p 进行优化, 得到了最大输出功率 P_{out} 随抽运功率 P_p 的变化, 结果如图 6 所示。其中抽运效率定义为 $\eta = (P_{out}/P_p) \times 100\%$ 。

由图 6 可见, 当抽运功率大于 2 W 后, 最大输出功率和抽运效率都趋于饱和, 因此, 将抽运功率恒取为 2 W。

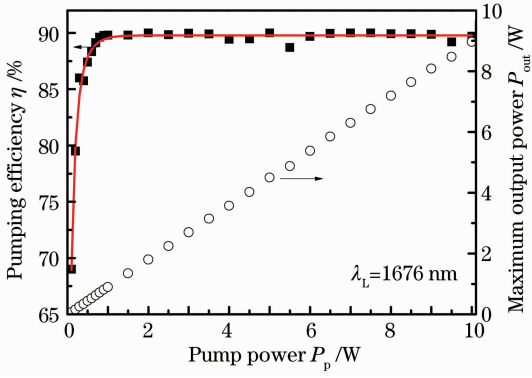


图 6 抽运效率和最大输出功率随抽运功率的变化 (实线是对抽运效率的拟合曲线)

Fig. 6 Pumping efficiency η and maximum output power P_{out} as a function of pumping power P_p , in which the solid line is fitting curve of pumping efficiency

数值求解方程(5)~(9)式,用遗传算法,以激光输出功率为目标函数,经过数十代的迭代运算,最后可得抽运波长 λ_p 、量子点数密度 N 、光纤长度 L 、谐振腔出射镜反射率 R_2 4 个参量的最优值,如表 4 所示。

表 4 优化后的 QDFL 参量

Table 4 Parameters of the optimized QDFL

Parameter	Value
λ_L / nm	1676
λ_p / nm	1556
N / m^{-3}	9.54×10^{22}
L / m	0.411
R_2	0.100
$P_{out}(\text{QDFL}) / \text{W}$	1.36

下面,以 1676 nm 激光波长为例,2210 nm 的激光波长情况类似。

图 7 为(彩图请见网络电子版,下同)谐振腔中激光功率随光纤长度的变化。作为对照,插图给出了常规掺镱光纤激光器(YDFL)的抽运光和激光功率随光纤长度的变化,由于 YDFL 的速率方程及激光功率方程亦可用(5)~(7)式描述,且其谐振腔结构也与本文 QDFL 相似^[17],因而可用 4.2 节的数值模拟法对其模拟。抽运功率、单模光纤芯半径、抽运光散射损耗、前腔镜反射率等均取与 QDFL 相同,但 QDFL 最佳的掺杂浓度比 YDFL 低了 3 个量级,这里取 YDFL 的掺杂浓度为 $N = 4 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$,上能级寿命为 $\tau = 8 \times 10^{-4} \text{ s}$,抽运光的吸收和发射截面均为 $2.5 \times 10^{-24} \text{ m}^2$,激光的吸收截面 $\sigma_{a,L} = 1.4 \times 10^{-27} \text{ m}^2$,发射截面 $\sigma_{e,L} = 2.0 \times 10^{-25} \text{ m}^2$,数据可参考文献[17]。由图 7 可见,在相同的工作参数下,QDFL 的输出功率略高于 YDFL,但 QDFL 饱和功

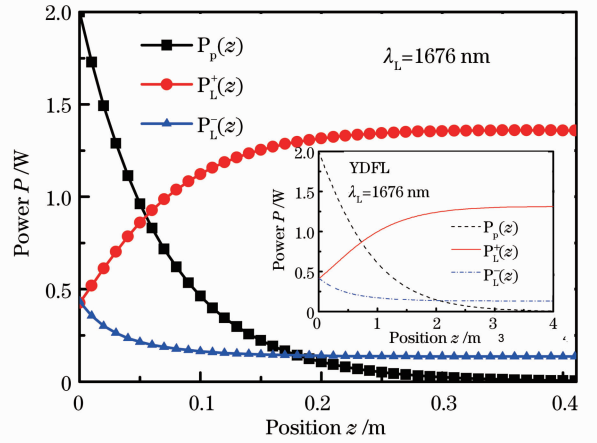


图 7 QDFL 抽运光功率和激光功率随光纤长度的变化,插图为 YDFL 的输出特性

Fig. 7 Pump and laser powers of QDFL as a function of fiber length, the inset is output characteristic of YDFL 率所对应的光纤长度远短于 YDFL。

图 8(a)为不同掺杂浓度下的最佳光纤长度和最大激光输出功率,图 8 中的实线和虚线是拟合曲线;图 8(b)为不同掺杂浓度下,光纤长度 L 与最大激光输出功率的关系。

由图 8(a)可见,在起始阶段,掺杂浓度 $N = 1 \times 10^{19} \sim 1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 时,最大输出功率 $P_{out,m}$ 也逐渐变大,该阶段可看成是出现激光的阈值阶段;当 $N \cong 1 \times 10^{20} \sim 2 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ 时, $P_{out,m}$ 随掺杂浓度 N 呈线性增加,这可看成是小信号激射线性增长的阶段;当 $N \geq 2 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ 后, $P_{out,m}$ 不再增加,此为饱和阶段。在起始及上升沿($N < 2 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$)阶段,最大输出功率 $P_{out,m}$ 随掺杂浓度的变化可用如下的指数方程表示:

$$P_{out,m}(N) = P_{out,0} \exp\left(-\frac{N_{th}}{N+C}\right), \quad (10)$$

式中 N_{th} 为掺杂浓度的阈值。由图 8(a)可知, $N_{th} \cong 1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$;常数 $C \cong 8.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 。可见,在起始及上升沿阶段,激光输出功率随掺杂浓度呈指数增长。此时,由于粒子数密度较低,因而激光功率很小。在线性增长阶段,随着量子点浓度的增大,激光能级粒子数密度增加,从而使得激光功率增大。随着掺杂浓度的进一步增加,激光上能级粒子数密度出现饱和,使得激光功率无法再进一步增大。

图 8(b)为在不同的掺杂浓度下,最大输出功率 $P_{out,m}$ 随光纤长度 L 的变化。在较高浓度下($N > 1 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$),最大输出功率随着光纤长度的增加急剧增加,达到饱和值后,再缓慢线性减小,并且掺杂浓度越大,达到饱和值所对应的光纤长度越短。

在低掺杂浓度下($N < 1 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$),在 0.1~10 m 的光纤长度范围,最大输出功率随光纤长度的增加而增加,从图 8(b)的变化趋势可以看出,低浓度下,最大输出功率达到饱和时所需的光纤长度更长。因而,在一定的掺杂浓度下,最大输出功率随光纤长度

的增加先急剧增加,达到饱和值后,再缓慢线性减小,掺杂浓度越大,达到饱和值所对应的光纤长度越短,但是最大输出功率的饱和值相同。由此可见,最大激光功率受限于光纤长度及掺杂浓度。

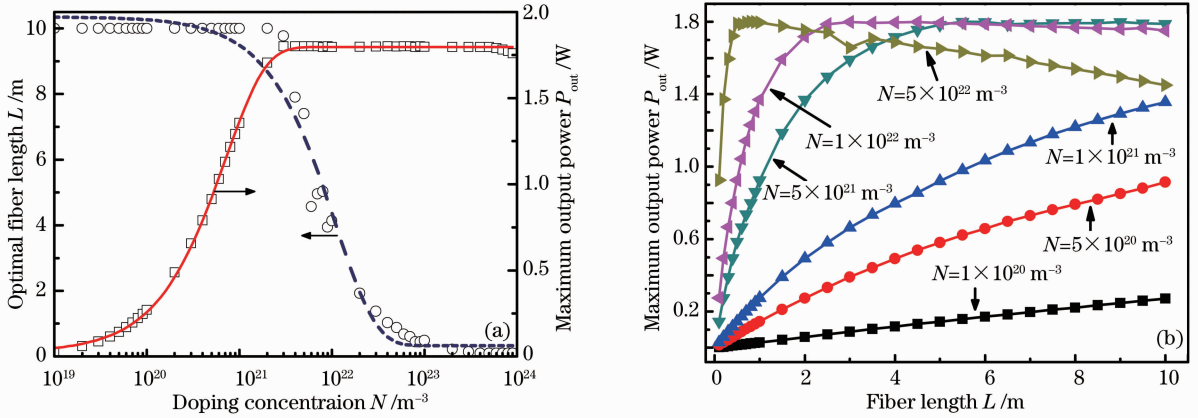


图 8 (a)最佳光纤长度和最大输出功率随量子点掺杂浓度的变化,实线与虚线是拟合曲线;
(b)在不同掺杂浓度下,最大输出功率随光纤长度的变化

Fig. 8 (a) Optimized fiber length and maximum output power as a function of doping concentration, in which the solid line and dash line are the fitting lines; (b) maximum output power as a function of fiber length with various doping concentrations

本课题组之前对 PbSe 量子点激光做了类似的数值计算^[21],其结果与图 8 的结果基本一致。

实际上,当掺杂浓度 $N > 10^{23} \text{ m}^{-3}$ 时,过短的光纤长度已变得没有实际意义。另一方面,在高掺杂浓度下,由于量子点之间的空间间隔很小(纳米量级),那么量子点被激发时,相当于两个量子点都被激发到同一高能态,量子点会通过两中心体中间的某一虚拟态,辐射出高能量的光子,出现类似于铊离子的“能级上转换”效应^[22],导致激光上能级粒子数下降,从而使得激光功率降低。

5 结 论

根据实测的 PbSe 量子点的吸收谱和发射谱,数值计算了以 PbSe 量子点作为激活增益介质的 QDFL。应用遗传算法,通过计算机数值求解粒子数速率方程和谐振腔中的激光振荡方程,优化计算了 QDFL 最佳的抽运波长、光纤长度、掺杂浓度及出射镜反射率。结果表明,QDFL 的饱和和抽运功率为 2 W。在 2 W 的抽运功率作用下,在 1676 nm 激光波长处,QDFL 最大输出功率可达 1.36 W,抽运效率达 68%。与通常的掺稀土离子(Yb^{3+} 、 Er^{3+})的光纤激光器相比,QDFL 具有抽运效率高、激励阈值低、掺杂密度可调和光纤饱和长度短等特点。由于量子点辐射波长的尺寸依赖特性,很容易形成多波

长激光或使波长可调,成为一种新型的激光器。

参 考 文 献

- 1 X. Michalet, F. F. Pinaud, L. A. Bentolila *et al.*. Quantum dots for live cells, in vivo imaging, and diagnostics[J]. *Science*, 2005, **307**(5709): 538~544
- 2 B. Pejova, I. Grozdanov. Three-dimensional confinement effects in semiconducting zinc selenide quantum-dots deposited in thin-film form[J]. *Mater. Chem. Phys.*, 2005, **90**(1): 35~46
- 3 C. Y. Yu, Helmut, A. Argyros, G. Leon-Saval Sergio *et al.*. Emission properties of quantum dots in polymer optical fibers[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(24): 21344~21349
- 4 M. T. Harrison, S. V. Kershaw, M. G. Burt *et al.*. Colloidal nanocrystals for telecommunications. complete coverage of the low-loss fiber windows by mercury telluride quantum dots[J]. *Pure Appl. Chem.*, 2000, **72**(1-2): 295~307
- 5 C. Cheng, H. Zhang. Characteristics of bandwidth, gain and noise of a PbSe quantum dot-doped fiber amplifier[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **277**(2): 372~378
- 6 Cheng Cheng, Zhang Hang. A semiconductor nanocrystal PbSe quantum dot-doped fiber amplifier[J]. *Physics 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
- 7 R. D. Schaller, M. Sykora, J. M. Pietryga *et al.*. Seven excitons at a cost of one: redefining the limits for conversion efficiency of photons into charge carriers[J]. *Nano. Lett.*, 2006, **6**(3): 424~429
- 8 J. Chang, C. Liu, J. Heo. Optical properties of PbSe quantum dots doped in borosilicate glass[J]. *J. Non-Crystalline Solid*, 2009, **355**(27-42): 1897~1899
- 9 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
- 10 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
- 11 H. S. Mansur, A. P. Mansur, J. C. González *et al.*. Synthesis and characterization of CdS quantum dots with carboxylic-functionalized poly (vinylalcohol) for bioconjugation [J]. *Polymer*, 2011, **52**(4): 1045~1054
- 12 Cheng Cheng, Cheng Xiaoyu. Optical Fiber Amplifier and Optimization Designs of the Devices[M]. Beijing: Science Press, 2011. 175
- 程 成, 程潇羽. 光纤放大原理及器件优化设计[M]. 北京: 科学出版社, 2011. 175
- 13 W. W. Yu, L. H. Qu, W. Z. Guo *et al.*. Experimental determination of the extinction coefficient of CdTe, CdSe, and CdS nanocrystals[J]. *Chem. Mater.*, 2003, **15**(14): 2854~2860
- 14 D. E. McCumber. Einstein relations connecting broadband emission and absorption spectra [J]. *Phys. Rev.*, 1964, **136**(4A): A954~A957
- 15 D. D. Nolte. Optical scattering and absorption by metal nanoclusters in GaAs [J]. *J. Appl. Phys.*, 1994, **76**(6): 3740~3744
- 16 Cheng Cheng, Cheng Xiaoyu. Optical Fiber Amplifier and Optimization Designs of the Devices[M]. Beijing: Science Press, 2011. 176
- 程 成, 程潇羽. 光纤放大原理及器件优化设计[M]. 北京: 科学出版社, 2011. 176
- 17 I. Kelson, A. Hardy. Optimization of strongly pumped fiber lasers[J]. *J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(9): 891~897
- 18 Cheng Cheng, Wu Yinfei. Numerical modeling of an unsaturated single-mode fiber laser doped with CdSe/ZnS quantum dots[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1014001
- 程 成, 吴寅飞. CdSe/ZnS 量子点飞饱和单模光纤激光器的数值建模[J]. 光学学报, 2011, **31**(10): 1014001
- 19 O. Svelto. Principles of Lasers[M]. New York: Plenum Press, 1998. 41~64
- 20 V. I. Klimov, A. A. Mikhailovsky, D. W. McBranch *et al.*. Quantization of multiparticle Auger rates in semiconductor quantum dots[J]. *Science*, 2000, **287**(5455): 1011~1013
- 21 Cheng Cheng, Kaihua Wei, Xiaoyu Cheng. A simulation of PbSe quantum dot-doped fiber laser[C]. Shanghai: Advanced Optical Technology and Application Conference, CLEO, 2009. ThA2
- 22 Y. Kimura, M. Nakazawa. Gain characteristics of erbium-doped fiber amplifiers with high erbium concentration [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(15): 1420~1422
- 23 K. Shriaki, M. Ohashi. Scattering property of fluorine-doped silica glasses[J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(17): 1565~1566
- 24 Cheng Cheng, Cheng Xiaoyu. Optical Fiber Amplifier and Optimization Designs of the Devices[M]. Beijing: Science Press, 2011. 54~58
- 程 成, 程潇羽. 光纤放大原理及器件优化设计[M]. 北京: 科学出版社, 2011. 54~58

栏目编辑: 宋梅梅