

基于量子尺寸效应的 InP 纳米内包层光纤 研制及放大性*

王 瑾[†] 张 茹[‡]

(北京邮电大学理学院光通信与光波技术教育部重点实验室 北京 100876)

(2008 年 6 月 23 日收到 2008 年 9 月 2 日收到修改稿)

利用改进的化学气相沉积法制作出纳米级 InP 薄膜内包层光纤,根据氢原子本征能量模型计算了 InP 微粒产生量子尺寸效应的相对粒径 $a_B = 8.313 \text{ nm}$,且由量子尺寸效应计算了不同尺寸粒子的带隙能量以及相对应的光吸收波长,由测试工作系统测试,在 906—1044 nm,1080—1491 nm,1524—1596 nm 波段上均有增益,结果表明:当内包层薄膜材料厚度达 5—50 nm 量级时,其能级将发生红移,产生放大性能.

关键词:纳米包层光纤,量子尺寸效应,光放大

PACC:6146,4281B,4255N

1. 引 言

随着人们对信息需求的快速增长,光纤通信技术成为信息高速公路的核心和支柱.其中,点到多点的全光高速密集波分复用技术(DWDM)和光纤放大器相结合是光通信发展的主流趋势,因此 DWDM 系统的发展必须与光纤放大器带宽扩展技术发展同步.但如何扩大密集波分复用系统的通信容量,提高光纤放大器放大带宽范围,是当前该领域研究的热点和难点.作为光纤放大器的核心部件,放大光纤的研究也随之成为了重中之重.掺稀土离子(如铒、镨、铥等)石英光纤放大器和激光器因体积小、光束稳定、功耗低等优点而得到广泛应用.掺铒光纤激光器与放大器由于其运转波长与光通讯的第三窗口(1.55 μm)相一致,近几年发展迅速,但由于在石英光纤中掺杂稀土离子这种掺杂稀土光纤,光纤较长占空间大,易受外界干扰,且每种掺杂光纤的带宽有限.另外,它的连接损耗大,也限制了它在光电子集成中的应用.在进行掺 Er^{3+} 双包层光纤放大器的研制过程中,由于 Er^{3+} 离子为三能级系统,只有基态的粒子才能获得增益,这就导致了抽运效率的降低.而且,为防止离子猝灭而导致量子效率降低或产

生自脉动现象,一般 Er^{3+} 的掺杂浓度不高于几个 100 ppm,这些因素导致了掺 Er^{3+} 光纤激光器的吸收率和斜率效率很低.

自从纳米材料逐渐被通信领域所重视,纳米材料的应用逐渐产生重要影响.利用纳米材料和纳米技术使光纤改性,越来越成为该领域国内外研究的热点之一^[1].2005 年,Tong 等人 and Lou 等合作发明的无包层纳米尺寸光纤,直径小至 50 nm^[2].芬兰 Liekki 公司基于纳米技术制作光纤获得成功,开发出一种新的光纤制备技术——直接纳米粒子沉积(DND)法.意大利 Syracuse 大学的光纤制造研究实验室制造出了一种光纤^[1],这是一种在纯石英纤芯上包裹一层只有几个 nm 厚的磷化镉半导体层的光纤.

由于光纤的材料成分、结构形式及制作方式是决定光纤特性的三大主要因素,因此希望通过改善现有放大光纤的掺杂材料和光纤的结构,来改性光纤,使其具有光放大特性.同时又由于双包层光纤独特的包层结构可以使高功率的多模激光耦合进入光纤,对纤芯进行抽运,从而可以得到高功率的激光输出,由于具有高输出功率、高转换效率,成为光纤器件领域的研究热点之一^[3].由于双包层光纤可制作出多种光纤光子器件,在光通信等高新技术领域有

* 国家自然科学基金(批准号:60544002,60871082)资助的课题.

[†] E-mail: wangjinandy@gmail.com

[‡] E-mail: rruzhang@yahoo.com

极为重要的应用前景. 基于以上分析, 同时由于 InP 是直接带隙半导体, 跃迁概率高, 抽运光的转化效率高, 借助于双包层的独特结构, 采用改进的化学气相沉积法, 通过温度、压强、速率控制, 研制出了在纤芯和包层之间加入一层纳米 InP 薄膜内包层的双包层光纤^[4].

2. 内包层光纤的试制

在纳米薄膜内包层放大光纤预制棒的制作过程中, 利用了改进的化学气相沉积法(MCVD), 其示意图如图 1 所示^[5].

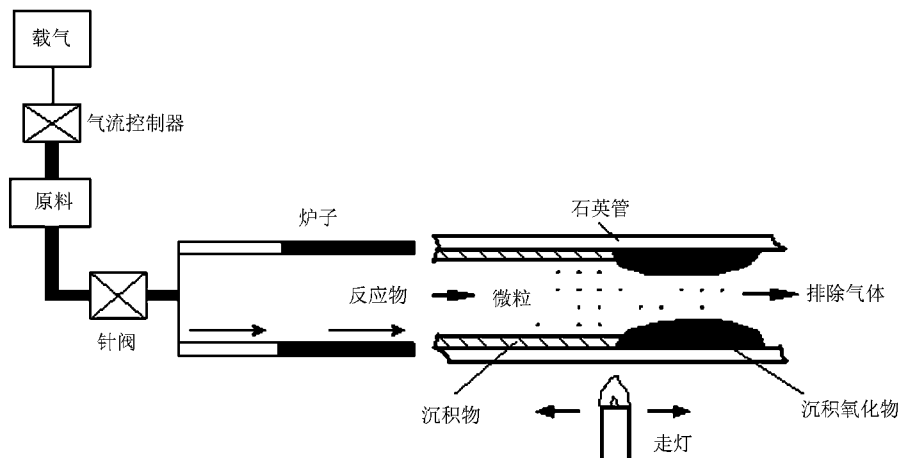
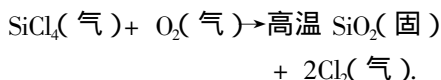


图 1 化学气相沉积法制备光纤预制棒

整个过程可分为五步进行:

第一步, 制作芯棒. 将石英反应管固定在改进气相沉积车床上, 用高纯 O_2 把 $SiCl_4$, C_2F_6 等材料带入反应管内, 由氢氧焰提供的高温沿反应管的方向往复运动, 在高温下各种材料进行化学气相反应, 并在管内形成了烟炱, 这种烟炱生成 SiO_2 等粉末状氧化物沉积在石英管的内壁. 化学方程式如下:



然后烧结反应管, 收缩成为透明的实芯光纤芯棒.

第二步, 制作外包层. 在 MCVD 制棒机上放置预制棒石英管, 在其下面设置固定加热汽化灯及移动加热灯, 用高纯 O_2 把 $SiCl_4$ 带入反应管内, 形成烟炱, 沉积 SiO_2 外包层.

第三步, 制作掺杂 InP 内包层. 用高纯 N_2 把汽化的 InP 带入到反应管内, 移动加热灯使其沉积成薄膜层.

第四步, 使用插棒技术, 将芯棒插入第二步和第三步共同制成的双包层石英管内, 再安装在 MCVD 制棒机上, 持续通入 N_2 .

第五步, 缩棒, 将第四步的石英管高温加热到

2000°C 左右, 使得掺杂 InP 的石英管塌缩成实芯的预制棒. 如图 2 所示.

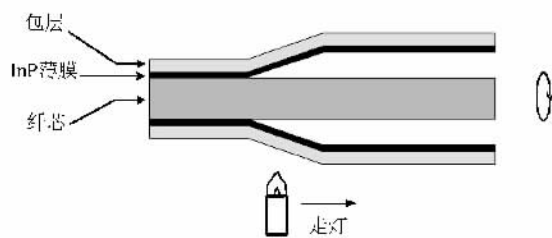


图 2 光纤预制棒

将预制棒夹在拉丝机上进行拉丝及热处理. 光纤拉丝机是制作光纤的主要设备, 光纤拉丝机的性能直接决定了所拉出光纤是否合格. 光纤拉丝机主要由送棒装置、加热炉、丝径仪、涂覆杯、固化炉、牵引轮、绕丝盘和控制单元几个部分组成.

在光纤拉丝机的整体结构中, 主要涉及到以下三个方面的控制问题:

- 1) 拉光纤的速度;
- 2) 预制棒的送给速度;
- 3) 加热电炉的温度控制.

拉丝机整体结构示意图如图 3 所示.

拉丝机运行过程如下: 先将预制棒悬挂于挂钩

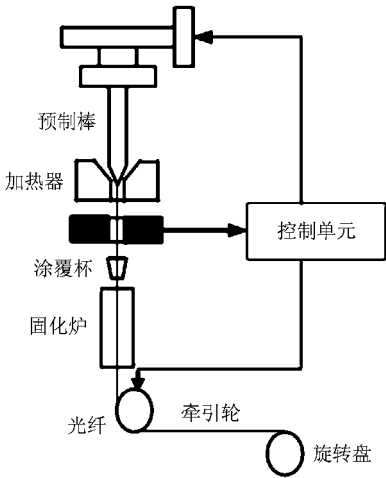


图3 拉丝机结构

上, 打开送给电机和拉伸电机使之运行, 送给电机的转动使滑动丝杠动作, 从而带动夹具运动使预制棒进入电炉中加热, 过了一定时间玻璃混合物熔化, 从电炉导出口流出, 经过测径仪, 在拉伸电机的拉力作用下, 光纤一直向下运动, 达到要求的长度后, 光纤被剪断。

为了得到高性能的掺杂纳米级 InP 材料光纤, 同时由于 InP 和 SiO₂ 的张力不同, 在拉丝过程中要尽量防止 InP 在纤芯中断裂、挥发, 拉丝机要采用低温(炉温控制在 1600—1700℃左右)慢速拉丝技术(拉丝速度小于 5 m/min)。该光纤的结构如图 4 所示, 其中, InP 的厚度为 5—70 nm, 纤芯的折射率为 $n_1 = 1.468$, 内包层的折射率为 $n_2 = 2.92$, 外包层的折射率为 $n_3 = 1.4646$ 。

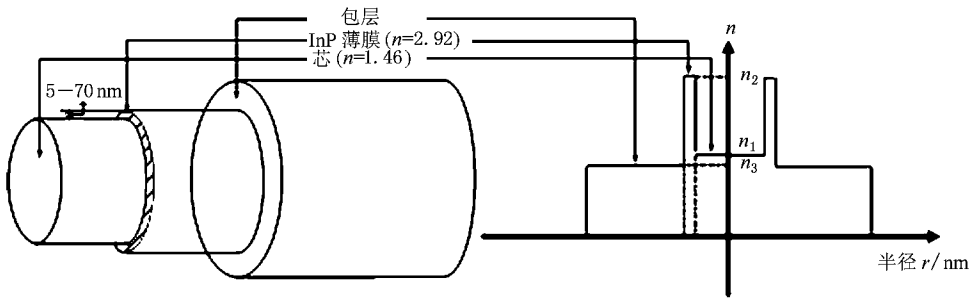


图4 光纤结构

3. 理论模型及计算

3.1. InP 纳米微粒的激子半径

通过以上方法拉制出的光纤与普通光纤比较, 在纤芯与包层之间夹有一层 InP 半导体材料, 由于光纤拉制技术和外界因素的干扰, 包层 InP 薄膜并非均匀, 厚度包含有 5—50 nm 部分, 由于材料尺寸达到纳米量级, 在这种情况下, 需要考虑量子尺寸效应。因此, 掺杂的 InP 材料尺寸大小成为问题的关键。Brus^[6]和 Kayanuma^[7]指出当纳米颗粒粒径 d 和激子有效半径玻尔半径 a_B 的比值是决定量子尺寸效应的关键参数。在半导体中, 激子是由一个电子和一个空穴组成。在半导体中, 当光将一个电子从价带激发到导带后, 导带中此电子与价带中留下的带正电空穴由库仑静电相互作用, 形成一个类氢原子的束缚态, 被成为激子。束缚电子(空穴)与杂质离子的作用可近似看成为杂质离子为中心的点电

荷库仑场对电子(或空穴)的作用。因而计算束缚电子(或空穴)的本征能量借由氢原子模型对其本征能量进行计算^[8]。氢原子的薛定谔方程为

$$\left[-\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m_0} - \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right] \Psi(r) = E_H \Psi(r), \quad (1)$$

$$E_H = -\frac{m_0 q^4}{8\epsilon_0^2 \hbar^2 n^2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

在半导体中点电荷库仑场受连续介质屏蔽, 库仑场减弱了 ϵ_s 倍 (ϵ_s 为半导体的相对介电常数)。激子态的类氢方程式为

$$\left[-\frac{1}{2m^*} \nabla^2 - \frac{e^2}{\epsilon r} \right] \Psi(r) = E \Psi(r), \quad (3)$$

其中 m^* 为电子 m_e 和空穴 m_h 的折合质量, $m^* = \frac{m_e m_h}{m_e + m_h}$; E 为激子的结合能; Ψ 为在有效质量近似下, 激子态的包络函数; $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_s$ 。

氢原子激子玻尔半径

$$a_0 = \frac{\epsilon \hbar^2}{\pi m_0 q^2} = 0.0529 \text{ nm},$$

激子玻尔半径

$$a_B = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s \hbar^2}{\pi m^* q^2} = \epsilon_s \left(\frac{m_0}{m^*} \right) a_0.$$

由于掺杂材料为 InP,故 $m_e = 0.077m_0, m_h = 0.400m_0$, 所以 $m^* \approx m_e = 0.077m_0$, 介电常数 $\epsilon_s = 12.100$ 故 $a_B = 8.313 \text{ nm}$. 在本实验光纤 d 为 5—50 nm 而 $2a_B = 16.626 \text{ nm}$. 由于 1) $d \geq 4a_B$ 时为弱限域 2) $2a_B \leq d \leq 4a_B$ 时为中等程度限域 3) 当 $d \leq 2a_B$ 时为强限域. 因此掺杂材料中具有满足 $d \leq 2a_B$ 的强限域条件的纳米微粒存在, 要考虑量子尺寸效应对光放大特性的影响.

3.2. 禁带宽度变化的计算

量子尺寸效应研究发现, 粒子产生的电子和空穴被限制在几何尺寸不大的位能阱中, 使分裂的电子态量子化并增大半导体的有效禁带. 量子尺寸效应作用下, 半导体禁带宽度等于非纳米级半导体材料的禁带宽度与量子尺寸效应引起的带隙改变量之和.

由 Brus 公式^[6]

$$E(r) = E_g(r = \infty) + \hbar^2 \pi^2 / 2m^* r^2 - 1.786e^2/\epsilon r - 0.248E_{Ry}, \quad (4)$$

式中 $E(r)$ 为纳米微粒的吸收带隙; $E_g(r = \infty)$ 为体相的带隙, InP 是直接带隙半导体, 体相材料的光吸收边在红外区, 室温 $E_g = 1.35 \text{ eV}$; r 为粒子粒径. 式中第二项为量子限域能 (蓝移), 第三项表明, 介电限域效应导致介电常数 ϵ 增加, 同样引起红移. 第四项为有效里德伯能. 其中第二项蓝移项, 对禁带宽度的改变为

$$\Delta E = \hbar^2 \pi^2 / 2m^* r^2 = \hbar^2 / 8m^* r^2. \quad (5)$$

以内包层薄膜 InP 为例, $m^* \approx m_e = 0.077m_0, \hbar = 6.62620 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, 同时根据公式

$$\Delta E = 100 \times (5.8d^2 + 27.2d + 10.4)^{-1} \quad (6)$$

计算出的厚度 d 在 10—25 nm 变化时对禁带宽度的改变量, 与 (5) 式计算结果基本相符. 如图 5 所示, 由 (5) 式和 (6) 式计算出厚度对应禁带宽度改变量 (蓝移项) 在同一坐标下的对比.

由 (4) 式

$$E(r) = E_g(r = \infty) + \hbar^2 \pi^2 / 2m^* r^2 - 1.786e^2/\epsilon r - 0.248E_{Ry},$$

我们得到当纳米微粒 InP 的尺寸 $r = 8.313$, 带隙能量 $E(r) = 0.819 \text{ eV}$, 其对应的光吸收波长 $\lambda = 1515 \text{ nm}$. 由 Brus 公式可以得到纳米微粒 InP 的尺寸 r 与

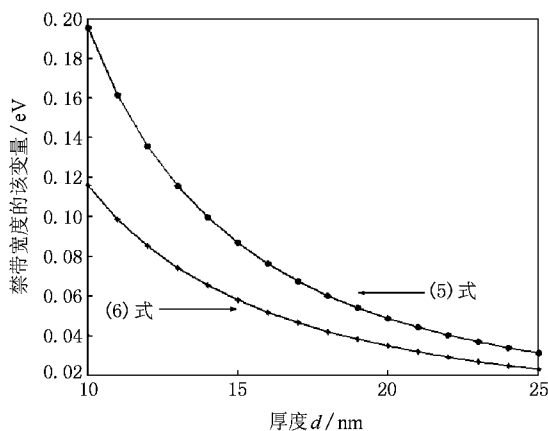


图 5 (5)和(6)式计算薄膜厚度对禁带宽度该变量(蓝移项)的对比

带隙能量 E 的关系、纳米微粒尺寸与光吸收波长 λ 的关系. 见图 6 和图 7.

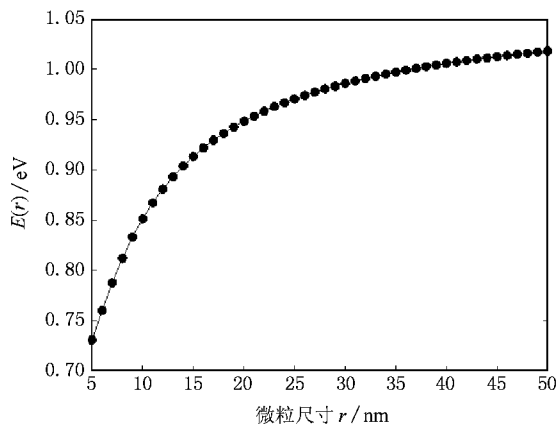


图 6 纳米微粒 InP 的尺寸 r 与带隙能量 E 的关系

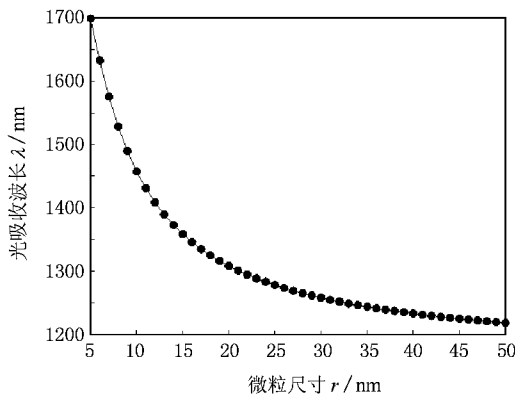


图 7 纳米微粒 InP 的尺寸与光吸收波长的关系

由图 6 和图 7 可以看出, 当纳米微粒 InP 的尺寸 r 在 5—50 nm 变化时, 其相应的带隙能量 E 的变

化范围为从 0.73 到 1.02 eV,光吸收波长 λ 为 1220—1700 nm.体相 InP 半导体材料室温下自身的带隙能量为 $E = 1.35$ eV,对应的光吸收波长为 $\lambda = 920$ nm.由量子尺寸效应分析得知,InP 纳米微粒的吸收带隙发生变化,其光吸收波长相对体相 InP 发生移动,对于粒径为 5—50 nm 的 InP 纳米微粒来说其对应的 λ 移到 1220—1700 nm.在光纤通信中,这一窗口范围正是光纤传输的低损耗窗口,具有十分重要的应用价值.由于量子尺寸效应的影响,当抽运光能量大于直接带隙能量,半导体材料会发生强烈的本征吸收,吸收光子后,其价带上的电子跃迁导带,导带上的电子受激辐射还可以再跃迁回价带而发生光子^[9].同时半导体材料受光激发后能够产生空穴-电子对(即激子),电子和空穴复合产生激子态发光.以上是量子尺寸效应直接影响光放大的原因,

同时由于量子尺寸效应,自由电子在单位面积上的浓度大于非纳米级尺寸的自由电子浓度,提高受激辐射光子的概率,这将有利于改善光纤的放大性能^[10].同时,嵌埋于介质中的半导体纳米尺寸晶粒,可能由于强量子限制和大的表面-体积比儿而具有大的光学非线性,发展成为制造光电和全光器件的新型材料^[11].

测试 InP 纳米薄膜内包层光纤的放大特性的工作系统如图 8 所示,工作系统由 InP 纳米薄膜内包层放大光纤、两个波分复用器(WDM)、抽运光源、信号光源以及输出端组成. InP 纳米薄膜内包层光纤位于两个 WDM 之间,抽运光通过 WDM 耦合进入 InP 纳米薄膜内包层光纤.以上实验测试,如图 9 所示,在 906—1044 nm,1080—1491 nm,1524—1596 nm 波段上均有增益.

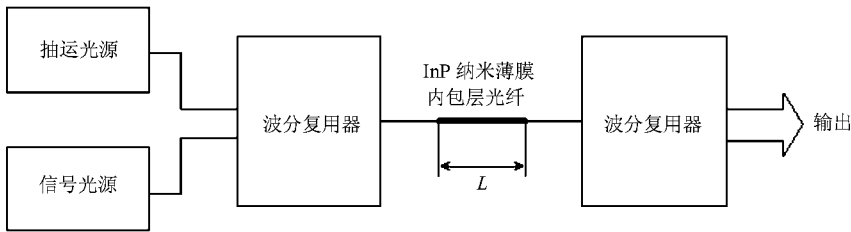


图 8 工作系统

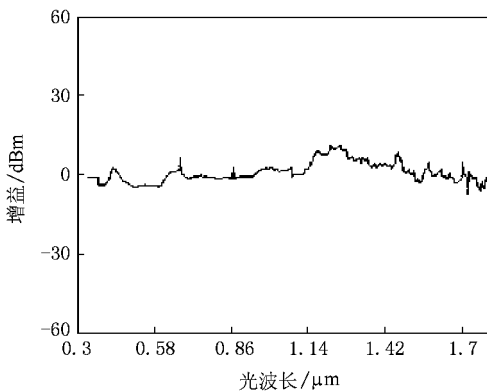


图 9 光放大增益谱曲线

4. 结 论

采用改进的化学气相沉积法,拉制出了在纤芯和包层之间加入一层 InP 半导体纳米材料薄膜的内包层光纤.由量子尺寸效应理论,计算 InP 半导体材料的玻尔激子半径,进而由计算出的 InP 玻尔激子半径可以看出当满足 $d \leq 2a_B$ 时的强限域条件时,量子尺寸效应明显.通过对禁带宽度该变量的计算,理论上得到了光纤的吸收带隙.因此,纳米薄膜内包层光纤对提高光纤的光放大特性必将起到一定的作用.

[1] John F D, Russell H, Kim J S 2001 *Proc. SPIE* **4216** 62
 [2] Tong L M, Lou J Y, Ye Z Z, Geoff T S, Eric M 2005 *Nanotechnology* **16** 1445

[3] Fu S G, Fan W D, Zhang Q, Wang Z, Li L J, Zhang C S, Yuan S Z, Dong X Y 2004 *Chin. Phys. Soc.* **12** 4263
 [4] Zhang R, Guan L M, Lee L G 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 998

- [5] Zhang R , Guan L M 2007 *J. Atom. Mol. Phys.* **24** 313 (in Chinese) [张 茹、关黎明 2007 原子与分子物理学报 **24** 313] [9] Tang A W , Teng F , Wang Y M , Zhou Q C , Wang Y S 2005 *Chin. J. Liquid Cryst. Displays* **20** 302
- [6] Brus L E 1984 *Chem. Phys.* **80** 4403 [10] Wang K X , Pang F F , Wang T Y 2007 *Chin. J. Lasers* **34** 398
- [7] Kayanuma Y 1988 *Phys. Rev. B* **38** 9797 [11] Ding R Q , Wang H 2001 *Chin. Phys. Soc.* **8** 1574
- [8] Zhu J 2006 *Nano-device and Materials* (Beijing : Tsinghua University) p11 (in Chinese) [朱 静 2006 纳米材料和器件 (北京 清华大学出版社) 第 11 页]

Fabrication of InP nano inner cladding fiber and its amplification property based on quantum size effect *

Wang Jin[†] Zhang Ru[‡]

(School of Ethnic Education , Beijing University of Posts and Telecommunications , Beijing 100876 , China)

(Received 23 June 2008 ; revised manuscript received 2 September 2008)

Abstract

We uses improved chemical vapour deposition and drew fibres with InP nano thin films. Based on the hydrogen atom model , we calculate the corresponding size of the InP particle $a_B = 8.313$ nm. By the quantum size-effect , we calculate the change of the energy band of particles with different sizes and the corresponding light absorption wavelength. From the system testing , the fibres have gain at 906—1044 nm , 1080—1491 nm and 1524—1596 nm. The results showed that the energy level of inner cladding materials creates a red shift when the thickness of thin-film is 5—50 nm. The fibre creates optical amplification.

Keywords : nano cladding fiber , quantum size effect , optical amplification

PACC : 6146 , 4281B , 4255N

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60544002 , 60871082).

[†] E-mail : wangjinandy@gmail.com

[‡] E-mail : rruzhang@yahoo.com