

锥形光纤结构形态对量子点光纤放大器性能的影响

苏采芸, 董艳华*, 赵阳阳

(上海大学 特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444)

摘要: 锥形光纤的结构形态对优化锥形光纤放大器光学性能具有重要意义。分析了不同结构形态锥形光纤的渐逝波透射深度的变化, 提出了 2 种锥形结构的优化方案, 并结合速率方程、功率方程及有限差分波束传输法建立了量子点锥形光纤放大器模型, 研究了锥形光纤结构形态对放大器性能的影响。仿真结果表明: 改变初始熔融长度和拉伸长度可使入射角在满足全反射条件下更接近临界角, 从而增加锥区表面的渐逝波深度, 优化后的锥形光纤结构形态有利于光纤放大器性能的提升。

关键词: 锥形光纤; 渐逝波; 量子点光纤放大器; 光学特性; PbS 纳米材料

中图分类号: TN914 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2021)10-0024-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.10.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effect of tapered fiber structure on the performance of quantum dot fiber amplifier

SU Caiyun, DONG Yanhua*, ZHAO Yangyang

(Key laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: The structure of tapered fiber is of great significance to optimize the optical performance of tapered fiber amplifier. The variation of evanescent wave transmission depth of tapered fiber with different structure forms is analyzed, and two optimization schemes of tapered fiber structure are proposed. Combined with rate equation, power equation and finite difference beam transmission method, the model of quantum dot tapered fiber amplifier is established, and the influence of tapered fiber structure form on the performance of the amplifier is studied. The simulation results show that changing the initial melting length and stretching length can make the incident angle closer to the critical angle under the condition of total reflection, so as to increase the evanescent wave depth on the surface of the cone. The optimized tapered fiber structure is conducive to the improvement of the performance of the fiber amplifier.

Key words: tapered fiber; evanescent wave; quantum dot fiber amplifier; optical properties; PbS nanomaterials

0 引言

锥形光纤因为原理简单、制备工艺成熟被广泛应用于传感器、放大器和滤波器等器件中。2008 年, 刘茜倩等人^[1]采用数值模拟了沿线性和抛物线形锥形的渐逝波透射深度变化, 优化了单锥形传感器探针的形状。2012 年, 周良等人^[2]通过数值模拟并分析了锥形光

收稿日期: 2020-05-07。

基金项目: 国家自然科学基金(61705126、61205172)资助。

作者简介: 苏采芸(1995—), 女, 硕士生, 现就读于上海大学通信与信息工程学院通信与信息系统专业, 主要从事 PbS 量子点锥形光纤放大器的制备与特性研究工作, 在优化锥形光纤放大器性能的研究中做出了重要贡献。

* 通信作者: 董艳华(1986—), 女, 博士, 讲师, 研究方向为特种光纤、光纤器件等。



纤的光场分布, 发现初始熔融长度和拉伸长度对传输效率的影响, 改善熔锥参数可以获得更好的传输效率。2014 年, YADAV T K 等人^[3]研究了不同锥腰直径的锥形单模光纤制备的温度传感器的温度敏感程度, 从而优化制备的锥形几何形状。2019 年, ZENG L 等人^[4]研究了不同锥形的掺镱锥形光纤放大器对非线性效应的抑制效果。同年, BOBKOV K K 等人^[5]成功制备了高峰值及平均功率的掺镱锥形光纤放大器。2020 年, ALVAREZ-CHAVEZ A 等人^[6]研究了不同形状的掺杂锥形光纤所制备的温度传感器的温度敏感程度。国内外多年的研究成果均表明锥形光纤形状的参数对应用锥形光纤制备的器件性能有很大影响。

近年来, 对掺稀土元素放大器的研究进入了瓶

颈。随着纳米技术的飞速发展,在锥形光纤表面涂覆量子点薄膜制备光纤放大器越来越具有可行性和优越性^[7-9]。目前,光纤放大器的研究主要集中在对量子点薄膜的优化。2013年,SUN X等人^[7]研究了多尺寸量子点掺杂薄膜制备的锥形光纤放大器的宽带特性。2018年,SUN X L等人^[8]通过溶胶凝胶法制备量子点薄膜,采用2种新型多功能共聚物进行改进,提高了光纤放大器增益。但是,针对锥形光纤结构形态对光纤放大器的影响和光学特性优化的研究较少,这影响了基于渐逝波理论的锥形光纤放大器研究的深入开展。

本文主要研究不同结构形态锥形光纤的渐逝波透射深度的变化,提出2种优化锥形结构的方案,并通过建立量子点光纤放大器模型,从理论和实验两方面研究锥形结构形态对放大器性能的影响。

1 理论分析

1.1 渐逝波原理

当光波在纤芯和包层界面发生全反射时,会有部分电磁波进入垂直于光纤轴向的包层区域中,并穿透约一个波长范围,这种电磁波被称为渐逝波。渐逝波透射深度公式^[10]为:

$$d_p = \frac{\lambda}{2\pi \sqrt{(n_1 \sin \theta)^2 - n_2^2}} \quad (1)$$

其中, λ 为入射波长, n_1 为纤芯折射率, n_2 为包层折射率, θ 为入射角度。本文主要研究包层和外层介质界面的渐逝波透射深度。

1.2 锥形光纤过渡区中光线轨迹分析

光线沿锥形光纤过渡区向前传输的轨迹图如图1所示。 r 为锥腰区域的光纤半径, $R(z)$ 为发射角 $\alpha(z)$ 对应的光纤半径,发射角随着光纤半径的减小而增大。设光纤轴线为 x 轴,在 x 轴向上取多个点,通过在每点处计算参数变化来仿真沿锥形光纤过渡区的渐逝波透射深度变化。以未拉锥区域为 x 轴原点,在 x 轴上距离为 z 时的点记为 z 点,相邻点之间的距离为 Δz 。

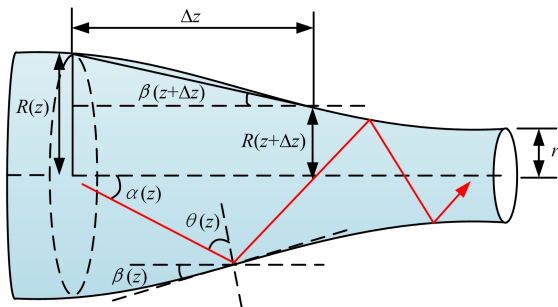


图1 锥形光纤中光线传输轨迹示意图

入射光与传输光纤轴向夹角随光纤半径的变化方程^[11]为:

$$R \sin[\alpha(0)] = R(z) \sin[\alpha(z)] \quad (2)$$

其中, R 为未拉锥区的光纤半径, $\alpha(0)$ 为入射进锥区光线与光纤轴线的初始发射角。在锥形区域内,包层与外层介质界面的入射角 θ 也是随光纤半径变化的,记为 $\theta(z)$ 。它与发射角 $\alpha(z)$ 和锥角 $\beta(z)$ 的关系为:

$$\theta(z) = \frac{\pi}{2} = \alpha(z) - \beta(z) \quad (3)$$

其中, $\alpha(z)$ 可由式(2)计算得出。而锥角 $\beta(z)$ 为入射光与包层和空气界面接触点的切线与 x 轴的夹角。对于非线性锥形过渡区,锥角 $\beta(z)$ 沿 x 轴变化,如果直接利用 $(R-r)/L$ 计算,误差较大,因此通过当前 z 点和前一个计算点 $z-\Delta z$ 来近似锥角 $\beta(z)$ 。当 $\Delta z \rightarrow 0$ 时,两点间连线逐渐近似于 z 点切线,由此得出锥角 $\beta(z)$ 的计算公式如下:

$$\beta(z) = \tan^{-1} \left[\frac{R(z-\Delta z) - R(z)}{\Delta z} \right] \quad (4)$$

将式(2)、式(3)和式(4)代入式(1)中,可得锥形过渡区的渐逝波透射深度 d_p 最终表达式为:

$$d_p = \frac{\lambda}{2\pi n_2 \sqrt{\cos^2 \left[\sin^{-1} \left(\frac{R_0 \sin \alpha(0)}{R(z)} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{R(z-\Delta z) - R(z)}{\Delta z} \right) \right] - \frac{n_3^2}{n_2^2}}} \quad (5)$$

其中, n_3 为外层介质的折射率。通过式(5)可以看出透射深度 d_p 是沿 x 轴的锥形光纤半径 $R(z)$ 的函数,通过优化过渡区形状 $R(z)$ 可以增强渐逝波深度,达到优化PbS锥形光纤放大器性能的目的。

1.3 锥形光纤锥腰区域光线轨迹分析

假设锥腰区域直径为 D ,总长度为 L_2 ,定义2个连续全内反射间沿光纤轴向的距离长度为 L_1 ,光纤中的光传播轨迹示意图如图2所示。

在外层涂覆薄膜的锥腰区域,外层沉积的薄膜对每一个全反射点的渐逝波进行吸收。当电磁波渗透进入外层薄膜,定义沿电磁波传播方向上的距离为位移 $\delta = 2d_p L_1 / D$,此位移可看作薄膜对电磁波的有效吸收路径。若内部反射总次数为 N ,则吸收路径的总长度 L_{abs} 为:

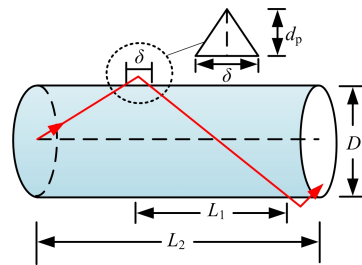


图2 光纤锥腰区域光线轨迹示意图

$$L_{\text{abs}} = N\delta = \frac{L_2\delta}{L_1} = \frac{2d_p L_2}{D} \quad (6)$$

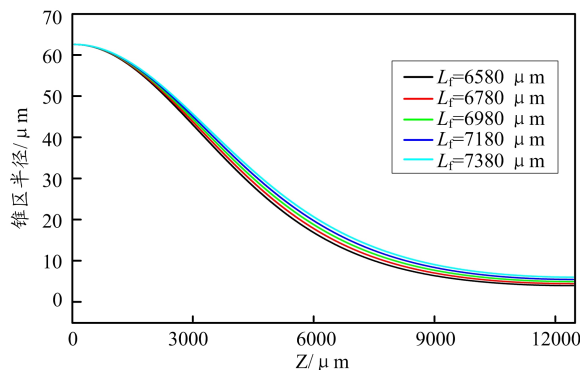
由式(6)可知,有效的吸收路径与锥腰总长度 L_2 成正比,与锥腰直径 D 成反比。随着锥腰直径的减小和锥腰长度的增加,同一束光线在锥腰中传输时具有更多的全反射点,增强了锥腰部分整体的渐逝波强度,有利于提高与表面 PbS 薄膜的作用范围,从而增强荧光强度。

2 性能仿真

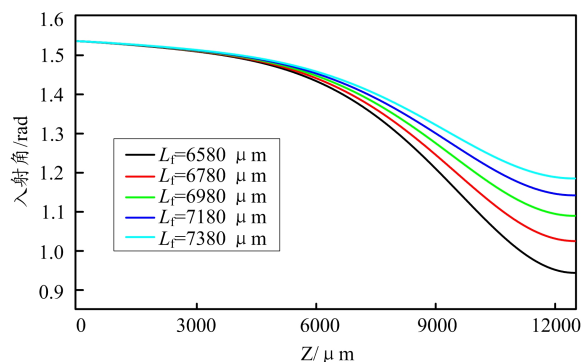
2.1 不同锥形结构下的入射角的变化

为了深入理解透射深度的变化原理,本文首先研究锥形(从未拉锥区域到锥腰中心的区域)的变化对入射角 $\theta(z)$ 的影响。锥形光纤是基于普通单模光纤制备的,设定未拉锥区光纤半径 R 为 $62.5 \mu\text{m}$,纤芯折射率 n_1 为 1.46,包层折射率 n_2 为 1.457,外层界质折射率 n_3 为 1,入射光波长 λ 为 $1.55 \mu\text{m}$,初始发射角 $\alpha(0)$ 由数值孔径 NA 得出。根据体积守恒原则推导出锥形光纤轴向形态^[2]。本文提出 2 种锥形结构的优化方案:

①改变初始熔融区长度。首先,当初始熔融区长度 L_f 分别为 $6580 \mu\text{m}$ 、 $6780 \mu\text{m}$ 、 $6980 \mu\text{m}$ 、 $7180 \mu\text{m}$ 和 $7380 \mu\text{m}$,拉伸长度均为 $25000 \mu\text{m}$ 时,光纤锥形结构如图 3(a)所示。横坐标 Z 表示光纤轴向方向上离光纤未发生形变面的距离。可以看出,初始熔融区长度越短,锥形光纤过渡区变化越大,且相同 Z 点处的光纤半径越小。然后,将不同锥形代入式(3)可得入射角 $\theta(z)$ 的变化,如图 3(b)所示。可以看出,初始熔融区长度越小,相同 Z 处的入射角越小且减小得越快,在过渡区尾端即锥腰区域入射角的最小值也越小。对于相同初始熔融长度的光纤结构形态及入射角曲线,入射角随着光纤半径减小而单调递减。根据渐逝波原理,光以较小的入射角入射时渐逝波透射深度会增加。因此,可以使锥形对应的入射角更接近于临界角而增加



(a) 锥形结构变化



(b) 入射角变化

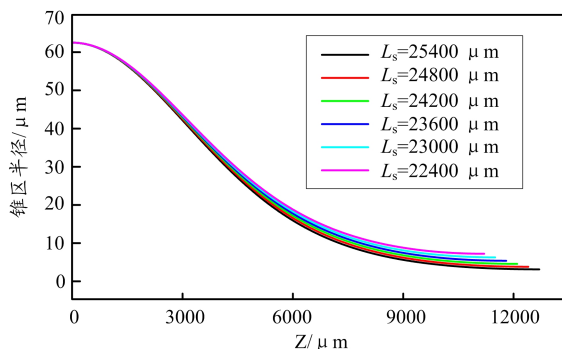
图3 初始熔融区长度变化下的锥形结构和入射角的变化

界面的渐逝波透射深度,这为通过几何光学方式优化锥形提供了很好的方向。本文研究的包层和外界空气的分界面中,入射角的临界角约为 0.756 rad 。当入射角等于临界角时,实际的透射深度不会被式(1)计算得无穷大,此时的光波会因为光纤表面的粗糙度引起散射而造成损失。渐逝波场的作用范围主要限制在离光纤表面几十到几百纳米的范围,一般为所传播光波的波长量级。

②改变拉伸长度。本文分别选取 6 个拉伸长度 L_s 为 $22400 \mu\text{m}$ 、 $23000 \mu\text{m}$ 、 $23600 \mu\text{m}$ 、 $24200 \mu\text{m}$ 、 $24800 \mu\text{m}$ 和 $25400 \mu\text{m}$ 的锥形光纤进行对比,此时初始熔融区长度为 $6530 \mu\text{m}$ 。不同拉伸长度的锥形结构和入射角变化情况如图 4 所示。可以看出,拉伸长度越长,入射角曲线越接近临界角。

2.2 不同锥形结构下的渐逝波透射深度的变化

本文分别研究上述初始熔融长度变化的 5 组参数和拉伸长度改变的 6 组参数相应的渐逝波透射深度,结果如图 5 所示。可以看出,在锥形变化之初,渐逝波透射深度没有太大变化;随着锥形继续变化,半径持续减小,透射深度有明显增强,不同参数的透射深度差异不断变大,最后在锥形末端即到达锥腰部



(a) 锥形变化

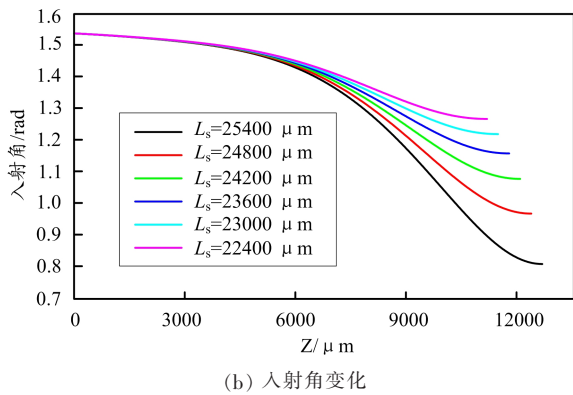
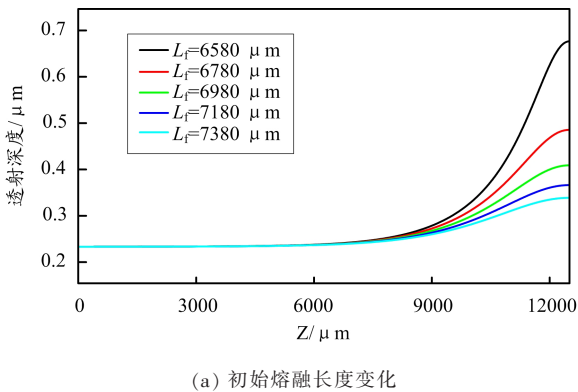
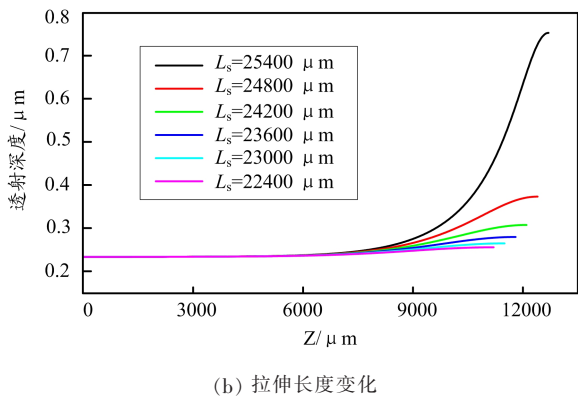


图4 不同拉伸长度的锥形结构和入射角变化情况



(a) 初始熔融长度变化



(b) 拉伸长度变化

图5 2种不同参数的渐逝波透射深度变化

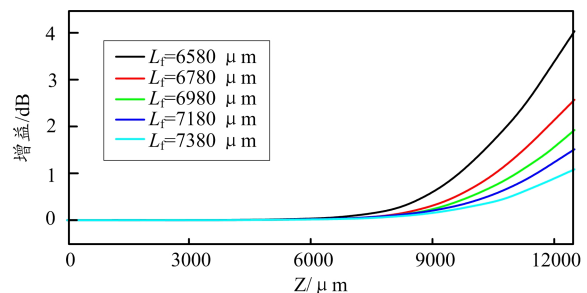
分,透射深度稳定,符合上述入射角的变化曲线。结合图3和图4可知,不同参数的透射深度变化随入射角的减小而增大,与上述讨论结果相一致。这进一步证实了减小初始熔融区长度和增大拉伸长度可增加锥形表面透射出的渐逝波深度。

2.3 锥形光纤结构对光纤放大器增益的影响

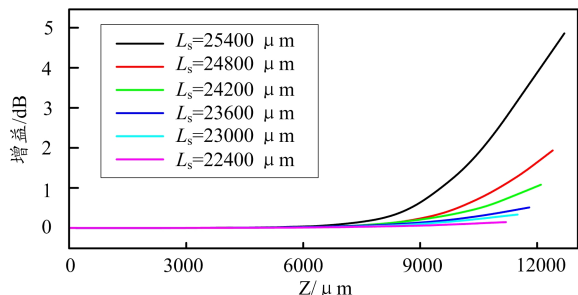
为了进一步研究锥形光纤结构形态对提升量子点光纤放大器增益特性的意义,本文将速率、功率方程及有限差分传输法相结合,建立量子点锥形光纤放大器理论模型^[13]。光纤放大器模型采用PbS纳米材料作为锥形光纤表面的增益介质,这是因为PbS具有较

大的波尔半径可以在较宽的粒径范围内产生量子效应。随着粒子尺寸的增加,其发光波段几乎覆盖了800~1600 nm的宽带(即整个光纤通信波段^[14-15]),具有广泛的光学应用价值,是制备量子点锥形光纤放大器的理想材料^[16]。此外,根据微米级别薄膜检测渐逝波透射深度对增益的影响,本文设薄膜折射率为1.4,薄膜厚度为6 μm,量子点浓度为 $5 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$,通过仿真模拟了当初始熔融区长度和拉伸长度等参数变化时信号光沿锥形的增益变化动态,如图6所示。可以看出,在锥形的前半部分信号光的增益无明显变化,这是因为此处的光纤尺寸较大,渐逝波深度很小,此时作用于薄膜的泵浦光和信号光功率几乎没有,无法激发PbS量子点的光辐射特性,所以信号光保持稳定的功率值向前传输;随着锥形光纤尺寸的进一步变化,信号光的增益才开始逐渐增大,这是由于随着锥形光纤直径变小,渐逝波深度不断增加,作用于薄膜的泵浦光和信号光功率也越来越强,PbS量子点的光辐射特性被明显地激发出来;最后,增益呈线性增加,因为此时为锥腰区域,锥形光纤直径不再变化,渐逝波深度不再增加,增益沿锥腰区域随渐逝波作用长度而稳定增加。对比图5和图6可知,锥形光纤放大器增益变化曲线渐逝波透射深度曲线的变化一致。

本文研究不同拉伸长度下信号光从未拉锥区传输到锥腰中心的总增益的变化。此时初始熔融区长度



(a) 初始熔融长度变化



(b) 拉伸长度变化

图6 不同参数变化下增益沿锥形的动态变化

苏采芸,董艳华,赵阳阳;锥形光纤结构形态对量子点光纤放大器性能的影响

为6880 μm ,信号光波长为1.55 μm ,功率为-30 dBm,泵浦光波长为980 nm,功率为500 mW。增益随拉伸长度的变化如图7所示。可以看出,随着光纤拉伸长度的增加,锥区长度延伸,得到的增益呈现平方率增长的趋势,使得渐逝波的作用长度沿轴向增加,外层薄膜被信号光受激辐射的区域更长,增益增大。沿径向,渐逝波透射深度增加,信号光作用于外层薄膜的区域更广,增益也会越大。

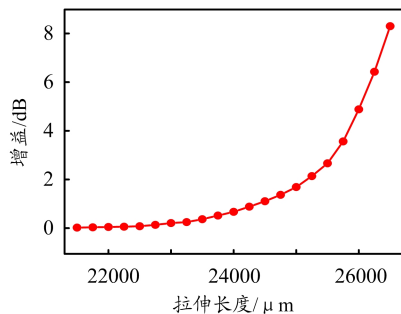


图7 增益随拉伸长度的变化

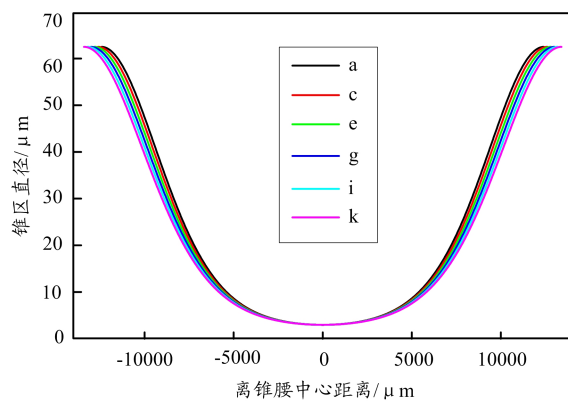
由上述分析可知,本文根据在锥区中使界面处入射角接近临界角这一思路可以使光纤放大器增益提升,当入射角无限接近临界角时,锥腰区域的直径约为8 μm 。在过渡区末端入射角无限接近临界角时,12组不同初始熔融长度对应的拉伸长度如表1所示。本文挑选其中的6组绘制了锥区形状曲线如图8(a)所示,横坐标为锥区轴向各点到锥腰中心的距离,观察到优化后锥区过渡区的形状不相同,但锥腰直径均约为8 μm (图8(a)中最低点即为锥腰直径)。再计算这12组参数对应的放大器增益,结果如图8(b)所示,随着拉伸长度的增加,增益一直呈上升趋势,这是因为此时各锥形渐逝波透射深度范围相同,拉伸长度大的锥形渐逝波的作用区域更长,使得增益更大。因此,在保证锥形损耗可以忽略(即绝热)的前提下,适当增加初始熔融长度和拉伸长度可以提高锥区整体的渐逝波强度,进而提高放大器的增益性能。

表1 优化后不同初始熔融长度对应的拉伸长度

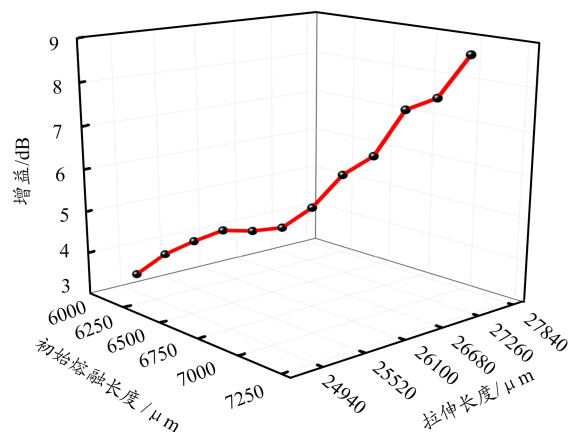
组号	初始熔融长度/ μm	拉伸长度/ μm	组号	初始熔融长度/ μm	拉伸长度/ μm
a	6180	24835	g	6780	26037
b	6280	25040	h	6880	26230
c	6380	25244	i	6980	26422
d	6480	25445	j	7080	26612
e	6580	25644	k	7180	26800
f	6680	25841	l	7280	26986

3 实验步骤与结果分析

本文采用原子层沉积(ALD)^[16]技术在锥形光纤表



(a) 锥腰直径不同时的荧光强度



(b) 优化后不同锥形对应的增益

图8 优化后的锥形及对应的增益变化

面沉积PbS纳米材料,并在显微镜下分别观察沉积前后的锥形光纤,对比图如图9所示。可以看出,沉积后的光纤颜色有明显变化,通过扫描电镜(SEM,JSM-7500F,Japan)观察到表面薄膜呈均匀颗粒状,尺寸约为10~20 nm。将通过单模光纤(SMF-28)熔融拉锥制得的锥腰直径 d_w 分别拉伸为13 μm 、12 μm 、11 μm 、10 μm 、9 μm 和8 μm ,火焰摆幅为4000 $\mu\text{m/s}$,火焰移动速度为1000 $\mu\text{m/s}$,步进台移动速度为120 $\mu\text{m/s}$ 的荧光谱结果如图10所示。从图10(a)可以看出,锥腰直径越小,锥形光纤拉伸长度越长;从图10(b)可以看出,随着锥腰直径的减小,荧光强度逐渐增强,这是因为锥形光纤长度增加,使渐逝波与薄膜的作用区域增

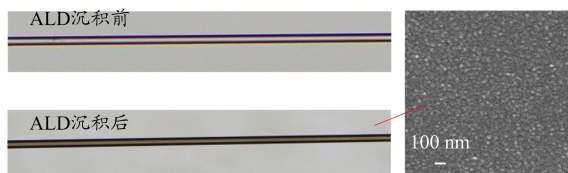
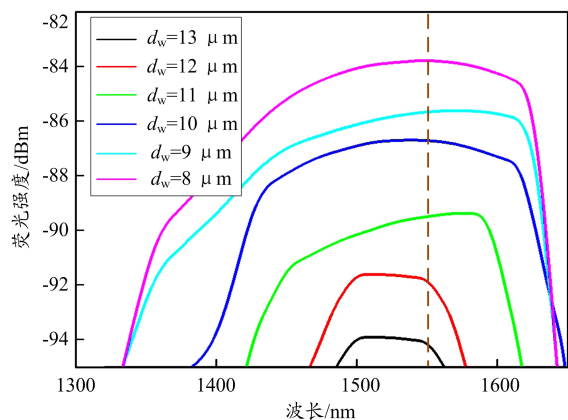
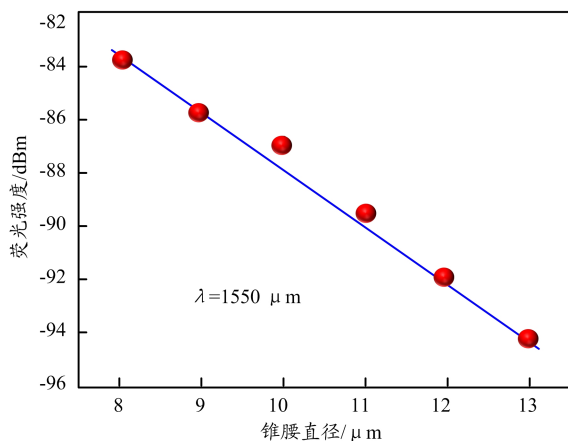


图9 显微镜下锥形光纤沉积前后对比图



(a) 锥腰直径不同时的荧光光谱



(b) 锥腰直径不同时的荧光强度

图 10 不同锥腰直径下的荧光光谱和荧光强度

加,更多的信号光激发 PbS 纳米材料实现受激辐射,从而增加荧光强度。实验结果与理论仿真结果相一致。

4 结束语

本文建立了不同结构形态锥形光纤渐逝波深度的理论模型,分析了初始熔融区长度和拉伸长度对锥区形状和渐逝波透射深度的影响,提出了 2 个优化锥形光纤结构形态的方案,并通过锥形光纤放大器模型验证了渐逝波强度和放大器增益的相关性。研究结果表明:通过改变初始熔融区长度和拉伸长度可提高锥区的渐逝波强度,进而增加外层薄膜与渐逝波的作用区域,达到优化锥形光纤放大器增益特性的目的;优化后锥腰直径约为 $8\text{ }\mu\text{m}$,并且增益会随着初始熔融长度和拉伸长度变化进一步提升。本文的研究方法为优化锥形光纤放大器提供了一种可行的方向,具有实际应用价值。

参考文献:

- [1] 刘茜倩,许雪梅,李维,等. 光纤倏逝波生物传感器探针新的几何设计[J]. 光电子技术,2008,28(1):21–25.
- [2] 周良,段开棕. 熔锥光纤的模场传输特性分析[J]. 红外与激光工程,2012(3):197–202.
- [3] YADAV T K, MUSTAPA M A, BAKAR M H A, et al. Study of single mode tapered fiber-optic interferometer of different waist diameters and its application as a temperature sensor [J]. Journal of the European Optical Society Rapid Publications, 2014(9): 14024-1–14024-5.
- [4] ZENG L, SHI C, XI X, et al. Study on stimulated Raman scattering in fiber amplifier employing tapered Yb^{3+} doped fiber[EB/OL]. [2020–05–07]. https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=1m5b0rh08y7a06p0u73e0me04b771505&site=xueshu_se.
- [5] BOBKOV K K, LEVCHENK A E, VELMISKIN V V, et al. High peak and average power Yb-doped tapered fiber amplifier[EB/OL]. [2020–05–07]. https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=CLEO_SI-2019-SM4E.2.
- [6] ALVAREZ-CHAVEZ A, VAZQUEZ-AVILA J L. Thermal effects on tapered holmium-doped fiber amplifiers[EB/OL]. [2020–05–07]. https://www.researchgate.net/publication/339829231_Thermal_effects_on_tapered_holmium-doped_fiber_amplifiers.
- [7] SUN X, CHEN J, DAI R, et al. Ultra-broadband multi-sized PbS quantum dots fiber amplifier based on a symmetric fiber coupler[EB/OL]. [2020–05–07]. https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=bab4ff91ea8ebec812974ad8b05a151b&site=xueshu_se.
- [8] SUN X L, ZHAO W, LIU L Y, et al. Enhancing environmental stability of a PbS quantum dot optical fiber amplifier via rational interface design[J]. Optical And Quantum Electronics, 2018, 50(4): 173–181.
- [9] LIANG Q, LI N, ZHOU B, et al. Gain stability in fluorine polymer modified PbS quantum dot fiber amplifier[J]. Journal of Physics Conference, 2017, 844: 126–130.
- [10] 王廷云,陈振宜,沈育青. 单模光纤渐逝波传输分析[J]. 光电子·激光,2003(2):28–31.
- [11] ANKIEWICZ A, PASK C, SYNDER A W. Total internal reflection fluorescence microscopy in cell biology[J]. Traffic, 2001(2): 744–764.
- [12] CHEN Z. Study of a dynamic-shape-curve function for a fused tapering optical fiber[J]. Applied Optics, 2006, 45(27): 6914–6918.
- [13] GUO H R, PANG F F, ZENG X L, et al. PbS quantum dot fiber amplifier based on a tapered SMF fiber [J]. Optics Communications, 2012, 285(13): 3222–3227.
- [14] HUANG X J, FANG Z J, PENG Z X, et al. Formation, element-migration and broadband luminescence in quantum dot-doped glass fibers [J]. Optical Express, 2017, 25(17): 19691–19700.
- [15] LIU Y, PEARD N, et al. Electronic, optical and transport properties of PbS nanocrystal superlattices[J]. Bulletin of the American Physical Society, 2019, 64(2): 742–749.
- [16] ZHENG J J, DONG Y H, PAN X P, et al. Ultra-wideband and flat-gain optical properties of the PbS quantum dots-doped silica fiber [J]. Optics Express, 2019, 27(26): 37900–37909.