

文章编号: 0258-7025(2002)09-0817-04

用于激光热疗的激光抽运高掺杂 光纤光热头研究

楼静漪, 童利民, 叶林华, 沈永行, 鲍世宁

(浙江大学物理系 浙江大学硅材料国家重点实验室, 浙江杭州 310027)

提要 利用晶体光纤中高掺杂离子的非辐射跃迁机制, 研制成功一种可用于激光热疗的高掺杂光纤光热转换头。在一个 809 nm 半导体激光器抽运下, 光热头在空气和蛋清样品中分别产生最高达 465℃(抽运功率为 1124 mW) 和 98℃(抽运功率为 933 mW) 的温度, 已足够用于激光热疗。同时, 光热头在温度稳定性、热响应时间、生物相容性、抗热冲击强度和化学稳定性等方面均能满足要求。

关键词 掺杂光纤 非辐射跃迁 光热转换 激光热疗

中图分类号 TN 253 文献标识码 A

Laser-pumped Heavily Doped Fiber-optic Thermal Tip for Laser Thermotherapy

LOU Jing-yi, TONG Li-min, YE Lin-hua, SHEN Yong-hang, BAO Shi-ning

(Department of Physics, State Key Laboratory of Silicon Materials,
Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027)

Abstract Based on non-radiation transitions of heavily doped ions in the crystal fiber, a laser-pumped fiber-optic thermal tip has been developed for laser thermotherapy. Pumping by a 809 nm laser diode, the thermal tip generates a maximum temperature of 465℃ in air (with pumping power of 1124 mW) and 98℃ in egg white (with pumping power of 933 mW), which is high enough for laser thermotherapy. Meanwhile, the thermal tip shows satisfactory results in temperature stability, thermal response time, biocompatibility, thermal impact resistibility, and chemical stability.

Key words doped fiber, non-radiation transition, photo-thermal conversion, laser thermotherapy

1 引 言

激光热疗有直接和间接两种方式。在直接照射治疗中, 热效应是通过激光与生物组织的相互作用产生的, 这种方式已在许多医学领域得到广泛应用。但是这种方式的缺点是激光热效应难以精确控制^[1], 所以在此情况下可以采用间接热疗方式, 通过一个光热转换装置将激光能量在到达组织之前转换成热能, 然后再进行热疗。传统光热转换头中比较典型的一种是在光纤输出端装一个金属帽^[2,3], 但

由于其热膨胀系数与光纤头部材料不匹配以及金属本身(如铜)易受化学腐蚀等问题, 在使用中转换头容易受损甚至引起金属帽脱落或光纤头部折断。其他类型的转换头如掺炭的“黑体头(black tip)”等也有局限性, 例如在空气中易氧化、碎裂等^[4,5], 因而在激光热疗中难以稳定可靠地使用。为了使间接型激光热疗具有更好的可靠性和稳定性, 并降低光热转换头的损耗, 我们研制出一种新型的光热转换头——高掺杂 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 晶体光纤光热转换头, 在该光热转换头中掺杂离子通过非辐射跃迁(多声子弛

收稿日期 2001-07-26; 收到修改稿日期 2001-10-30

基金项目 国家自然科学基金(59906011)和激光技术 863 青年基金(863-410-2000-5)资助项目。

作者简介 楼静漪(1975—), 女, 浙江大学物理系在读博士, 从事光波导及应用、光子器件、激光与材料相互作用等研究。

E-mail: loujy2001@yahoo.com.cn

豫)将激光能量高效地转换成热能,使加热光纤头达到所需的温度。由于光纤头的基本材料与传输光纤一样均为 YAG 晶体,两者的热膨胀系数等物理特性一致,不会在热疗中由于温度变化而引起内应力的不均匀分布,并且 YAG 晶体化学性质远比一般金属稳定,熔点高达 1930℃,即使在高温下也不会被氧化,从而避免了其他转换头易氧化、碎裂等一系列问题。掺杂晶体光纤光热头的这些优良特性使它在激光热疗领域具有很好的应用前景。

2 掺杂光纤光热头的结构和制作

光纤光热头的结构如图 1 所示。使用一根纯的单晶光纤作为基体和传输光纤,在其末端制作掺杂光热头。抽运激光从左端耦合进入光纤,以低损耗在光纤中传输到达右端的掺杂头,在掺杂头中激光能量被掺杂离子吸收并通过多声子弛豫的非辐射跃迁效应转换成热能。

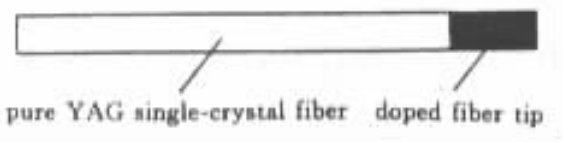


图 1 用于光热转换的掺杂光纤头结构

Fig.1 Configuration of the doped fiber tip for photo-thermal conversion

基于对现有掺杂离子的研究基础及其强吸收峰可与小型半导体激光器相匹配的优良特性,选择 Nd^{3+} 作为掺杂离子。理论和实验研究结果均表明^[6,7]在 Nd:YAG 晶体中,当 Nd^{3+} 的浓度超过 5 at.-%,声子弛豫成为主导跃迁模式,当掺杂晶体达到一定吸收厚度后,几乎所有被 Nd^{3+} 离子吸收的抽运光能量都能转换成热能,由此加热掺杂晶体,使其达到一定的温度。

纯 YAG 单晶光纤是用 LHPG(激光加热基座)法生长的,长度为 120 mm,直径为 0.75 mm,光纤在 810 nm 处的总光损耗为 1.0 dB。掺杂光纤头的制作如图 2。首先按比例($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Nd}_2\text{O}_3 = 9.87 \text{ wt.-%} : 48.58 \text{ wt.-%} : 41.55 \text{ wt.-%}$)配制粉末,使其中 Nd^{3+} 的掺杂浓度为 12 at.-%,加无水酒精均匀混合(图 2(a));使用一小型油压机将粉末压制成尺寸为 2.2 mm × 2.2 mm × 30 mm 的矩形粉末棒(图 2(b));将粉末棒置于 1200℃ 高温炉中烧结 2 小时,得到更为致密结实的烧结粉末棒(图 2(c));然后在 LHPG 装置

上使用已生长的纯 YAG 单晶光纤作为籽晶,在 CO_2 激光加热下,提拉烧结源棒(图 2(d));从而在 YAG 光纤末端生长出一段高掺杂光纤头(图 2(e))。生长成型的掺杂光纤头近似为一圆柱体,长度为 1.9 mm,平均直径为 0.86 mm。使用一个中心波长 809 nm,带宽 $\pm 1.7 \text{ nm}$ 的半导体激光器作为光源,在其光源光谱范围内,测得 12 at.-% 掺杂的 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 薄晶片的平均吸收系数约为 5 mm^{-1} ,可计算出 1.9 mm 长度的光纤头对此波段入射激光能量的透射率仅为 7.5×10^{-5} ,已足以吸收几乎全部的入射光能量。

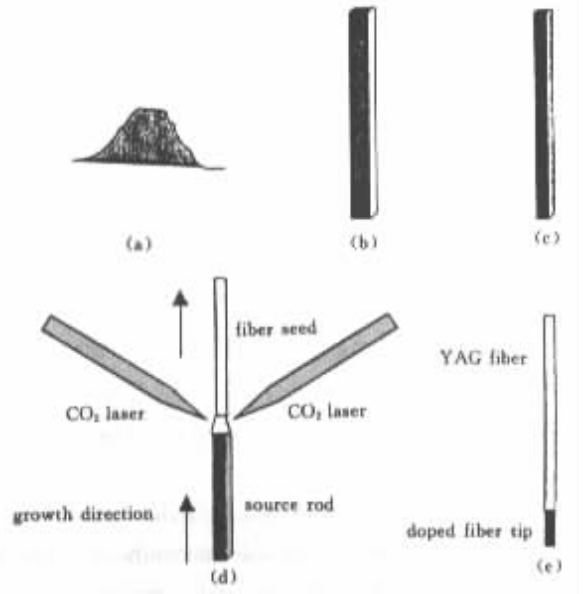


图 2 掺杂光纤头的制作过程

(a) 均匀混合的粉末原料 (b) 粉末压制棒 (c) 粉末烧结棒;
(d) 掺杂光纤头生长 (e) 生长成型的掺杂光纤头

Fig.2 Fabrication process of the doped fiber tip

(a) homogeneously mixed powders; (b) pressed-powder rod; (c) sintered-powder rod; (d) growth of doped fiber tip; (e) as-grown doped fiber tip

3 光纤光热转换头的实验测试

3.1 测试系统

光纤光热转换头测试系统如图 3 所示。我们采用一个中心波长 809 nm(27℃),光谱带宽为 $\pm 1.7 \text{ nm}$ 的 GaAlAs 半导体激光器作为抽运源,与 Nd:YAG 晶体位于 808 nm 附近的强吸收峰能很好地匹配,其最大输出功率为 3 W。激光经聚焦进入石英光纤(纤芯直径为 600 μm ,长度为 2 m,数值孔径为 0.32),然后传入 YAG 单晶光纤,最后到达掺杂光纤头。石英光纤($n = 1.46$)与 YAG 光纤($n = 1.82$)

之间使用折射率为 1.59 的匹配液以增大耦合效率。使用一个经过微细加工制作的 K 型(NiCr—NiSi)热电偶来测量光纤光热头的温度,热电偶丝的直径约为 60 μm ,经标定其测量值与线性度在 5% 精度范围内,与常规 300 μm 直径的 K 型热电偶完全一致。对激光器加装了一个半导体制冷器,使激光器金属封装壳的温度恒定在 27 $^{\circ}\text{C}$,激光波长漂移小于 ± 0.5 nm。

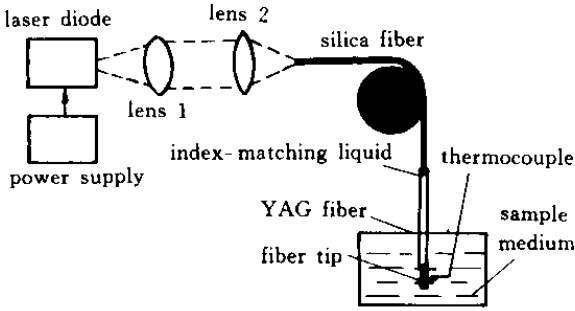


图 3 光纤光热转换头的实验测试系统
Fig.3 Experimental system for fiber thermal tip

实验所用半导体激光器的输出功率在 0.5 ~ 3.0 W 之间可精确地通过输入电流线性控制,在实际测试前,使用一根同样直径和长度但不带掺杂头的 YAG 光纤,先行测试了聚焦、耦合和光纤传输等过程对激光的总传输效率(为 41.6%)得到 YAG 光纤末端输出激光功率与半导体激光器输入电流的精确关系,以此确定实验中输入掺杂光纤头的抽运激光功率。

3.2 光纤头温度与抽运功率的关系

分别在空气和蛋清中测试了光纤光热头的温度和输入激光功率的关系。实验中热电偶探头紧贴光热头中心,光纤光热头的输入激光功率通过半导体激光器的输入电流和先前得到的线性关系计算得到,室内恒温(27 $^{\circ}\text{C}$)。

首先在空气中测试,光热头置于空烧杯中,激光器输入电流以 50 mA 逐步增加,对应光纤光热头输入功率以 21.3 mW 逐步增加,光纤光热头输入功率范围为 358 ~ 1124 mW,每次测量延迟时间为 15 ~ 20 s,记录光纤头温度与抽运功率的关系,测量结果如图 4(a)。然后在烧杯中注入大约 3/4 容积的蛋清,使光热头浸没在液面下 30 mm 处,激光器输入电流以 100 mA 逐步增加,对应光纤光热头输入功率以 42.6 mW 逐步增加,光纤光热头输入功率范围为 336 ~ 933 mW,由于当功率增加到 933 mW 时,光纤头温

度已接近 100 $^{\circ}\text{C}$,所以没有进一步增加功率,每次测量延迟时间为 10 ~ 15 s,记录光纤头温度与抽运功率的关系,测量结果如图 4(b)。

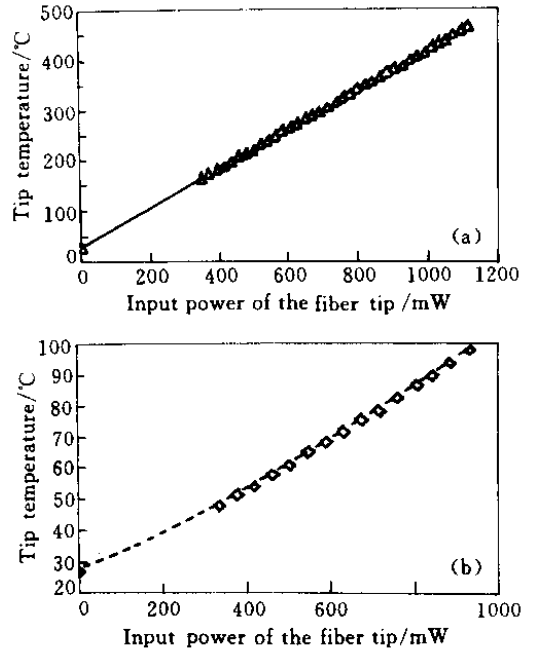


图 4 空气(a)和蛋清(b)中光纤光热头温度与输入功率的关系

Fig.4 Fiber-tip temperature versus input power in air(a) and in egg white(b)

图 4(a)(b)的实验结果显示,在我们的测试范围内,光纤光热头的温度在空气和蛋清中均随着输入功率的增加而线性增加,而且温度在恒定输入功率下非常稳定,温度变化小于 0.5 $^{\circ}\text{C}$,这说明光纤光热头的温度可以根据需要由激光抽运功率精确地线性控制。光纤光热头在空气和蛋清中达到的最高温度分别为 465 $^{\circ}\text{C}$ (抽运功率为 1124 mW)和 98 $^{\circ}\text{C}$ (抽运功率为 933 mW)。在蛋清实验中,当光纤头温度达到 50 $^{\circ}\text{C}$ 左右时,光纤头附近开始出现不透明的白色凝结物,实验结束后,光纤头上附着了一团直径约为 3.5 mm 的凝结物。由于生物组织中蛋白质的热凝固温度为 45 ~ 50 $^{\circ}\text{C}$ ^[1],光纤头产生的温度对于激光热疗和手术前后高温杀菌已足够。

3.3 光纤光热头的热响应时间

利用图 2 的系统,还测量了光纤光热头的热响应时间。这里定义热响应时间为:光热头从接收到抽运光时刻起至温度升高到其最后稳定温度的(1 - 1/e²) \approx 86% 所需的时间。在空气和蛋清中分别使用不同抽运功率测量了热响应时间,结果如图 5。

与光纤头直径(0.86 mm)相比,实验中使用的热电偶丝非常细(直径约为60 μm),因此热电偶本身的热响应时间可忽略。图5结果显示光热头在空气中的平均热响应时间大约为9s,在蛋清中大约为5.5s,这样的响应时间在绝大多数激光热疗(时间通常在数分钟以上)的应用中都可以接受。

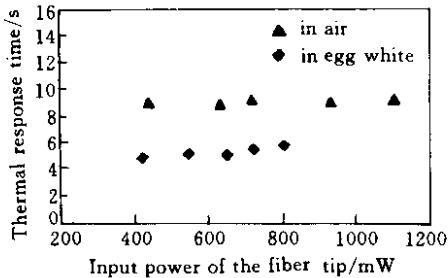


图5 空气和蛋清中光纤光热头的热响应时间

Fig.5 Thermal response time of the fiber thermal tip in air and egg white

3.4 光纤光热头的其他性能

由于我们研制的光纤光热头主要用于激光热疗等医学应用,因此,其生物相容性、机械强度、热转换效率、抗热冲击强度和化学稳定性等性能也必须加以考虑。

因为Nd:YAG晶体即使在高温下对生物组织也是无毒的,所以它能直接用于接触性手术操作。而掺杂头是在熔融状态下从纯的YAG光纤上直接生长,具有很高的结构强度和相互匹配的热膨胀性能。我们利用积分球技术测量了光热头的热转换效率,结果为90%左右。为测试其抗热冲击性能,把光热头在空气中加热到200 $^{\circ}\text{C}$ 以上,然后突然浸入水中,在数十次重复试验中,光热头没有发现任何损伤,说明光纤头的抗热冲击强度是足够的。另外,光热头在氧化气体和还原气体中都很稳定。利用激光抽运将光热头在空气中加热到400 $^{\circ}\text{C}$ 以上,累计时间超过10h,没有发现任何性能退化,说明光热头可稳定地重复使用。依次将光纤头浸在盐酸、NaOH溶液和热硫酸中达数小时之久,没有发现明显的被腐蚀痕迹。说明Nd:YAG掺杂光纤头对一般液态化学试剂也具有强的耐腐蚀性,表现出很高的化学稳定性。

4 结 论

用粉末掺杂技术和激光加热基座晶体光纤生长系统,研制了一种可用于激光热疗的新型光热转换

器件——高掺杂光纤光热转换头。实验结果表明,在中心波长为809 nm的半导体激光抽运下,光纤光热头能在空气和蛋清中产生足够用于激光热疗的温度。光热头的温度稳定性优于0.5 $^{\circ}\text{C}$,并与抽运功率成线性关系,表明光热头的温度可由输入激光功率来精确控制。光热头的热响应时间也满足激光热疗的要求。同时,掺杂光纤头在生物相容性、耐高温性、抗热冲击强度和化学稳定性等方面的优良特性,也使它比其他同样用途的光热转换器具有更优越的应用性能,使它更适用于激光热疗等医学应用。

致谢 感谢浙江大学材料系陈继勤教授在粉末掺杂方面给予的有益帮助。

参 考 文 献

- 1 Markolf H. Niemz. Laser-Tissue Interactions: Fundamentals and Applications [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1996
- 2 Hany Hussein. A novel fiber optic laser probe for treatment of occlusive vessel disease [C]. *SPIE*, 1986, **605**: 59 ~ 66
- 3 Xia Liu, Youchi Guo. Effects of Nd:YAG laser-heated metal cap on human platelets in vitro [C]. *SPIE*, 1993, **1616**: 563 ~ 569
- 4 W. P. Vandertop, R. M. Verdaasdonk, C. F. P. van Swol. Laser-assisted neuroendoscopy using a neodymium-yttrium aluminum garnet or diode contact laser with pretreated fiber tips [J]. *Journal of Neurosurgery*, 1998, **88**(1): 82 ~ 92
- 5 R. M. Verdaasdonk, W. P. Vandertop, W. Ansink *et al.*. Laser-assisted neuroendoscopy using Nd:YAG and diode contact laser with "Black" fiber tips [C]. *SPIE*, 1997, **2970**: 591 ~ 598
- 6 A. A. Kaminskii. Laser Crystals [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1981
- 7 V. Phomsakha, N. Djeu. Fiber-optic high-temperature thermal source [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1996, **67**(8): 2987 ~ 2988