

热键合 YAG/Nd:YAG 复合晶体的透过光谱研究

孙敦陆, 张庆礼, 王召兵, 苏 静, 谷长江, 张 霞, 邵淑芳, 王爱华, 殷绍唐

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘要:本文在一定的温度和压力下,通过热键合技术,获得了 YAG/Nd:YAG 复合晶体。这种复合晶体在非吸收波段的光学透过率与通过一块相同厚度 Nd:YAG 晶体的光学透过率实验值以及理论值相一致。因此从透过率的角度,表明纯 YAG 晶体与 Nd:YAG 晶体间的键合区域为均匀过渡,基本上无散射界面存在,实现了一体化。

关键词:复合晶体; 热键合; 透过率; 键合面

中图分类号:O734

文献标识码:A

文章编号:1000-985X(2005)02-0229-04

Study on the Transmission Spectra of the Composite YAG/Nd:YAG Crystal

SUN Dun-lu, ZHANG Qing-li, WANG Zhao-bing, SU Jing, GU Chang-jiang, ZHANG Xia,
SHAO Shu-fang, WANG Ai-hua, YIN Shao-tang

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(Received 5 November 2004)

Abstract: A composite YAG/Nd:YAG crystal was obtained by using the thermal bonding technique under a specific temperature and pressure. The optical transmission ratio of the composite YAG/Nd:YAG crystal is equal to the experimental and theoretical values of the Nd:YAG crystal with a same thickness. The results indicate that the bonding region between the pure YAG crystal and Nd:YAG crystal is uniformly transited, almost having no scattering interface and being a unity.

Key words: composite crystal; thermal bonding; transmission; bonding interface

1 引 言

热键合也称扩散键合,就是首先将两块经过精密加工的晶体经过一系列表面处理后,紧密地贴在一起,在室温下形成光胶,然后再对晶体进行热处理,在无需其它粘接剂和高压的情况下形成永久性键合^[1]。此项技术最早被用于半导体工艺中,在 20 世纪 90 年代开始用于光学晶体的热键合。目前美国、日本和英国等国都已经成功地实现了这项技术,完成了如 YAG, GGG, YVO₄, Ti:Sapphire 等许多光学晶体的热键合^[2-6],并将其应用到了各种领域。E. C. Honea 等人^[7]对 YAG 与 Tm:YAG 键合构成的复合晶体的热性能和光束质量进行了研究,结果表明不掺杂晶体键合在同基质掺杂晶体的两端作为端帽时,端面温升很小,接近冷却剂的温度,减少了热透镜效应和分光镀膜的热诱导波长移动造成的端面扭曲,有利于激光器的稳定及高功率的激光运转。因此这种热键合技术在激光应用方面不仅可以大大改善激光热性能和光束质量,而且有利于激光系统的集成化和获得大尺寸晶体。我国对光学晶体的热键合还处于刚刚起步的阶段,近年,中国科学院安徽光学精密机械研究所已成功实现 Nd:YAG、Yb:YAG、Tm:YAG 等掺杂晶体与纯 YAG 晶体的高温键合,目前正对此复合晶体进行相关研究。

收稿日期:2004-11-05

基金项目:国家自然科学基金(No. 50472104)资助项目

作者简介:孙敦陆(1972-),男,安徽省人,博士生。E-mail:dlsun@aiofm.ac.cn

本文中,在热压条件下,通过热键合技术,将纯 YAG 与 Nd:YAG 键合在一起,得到了复合结构的晶体。用透射光谱对其光学特性进行了研究。

2 实验

将 YAG 晶体与 Nd:YAG 晶体的(111)晶面经严格抛光和表面处理,使其具有高的光洁度和平面度,在室温下进行光胶。然后在我们特制的热压装置上,在适当的温度和压力下,加热加压并恒温数小时后,缓慢降至室温,实现了晶体的键合。我们还对 Yb:YAG/YAG 晶体进行了热键合。制备的复合 YAG/Nd:YAG、YAG/Yb:YAG/YAG 晶体如图 1 所示。



图 1 YAG/Nd:YAG 和 YAG/Yb:YAG/YAG 复合晶体
Fig. 1 Photograph of the composite YAG/Nd:YAG and YAG/Yb:YAG/YAG crystals

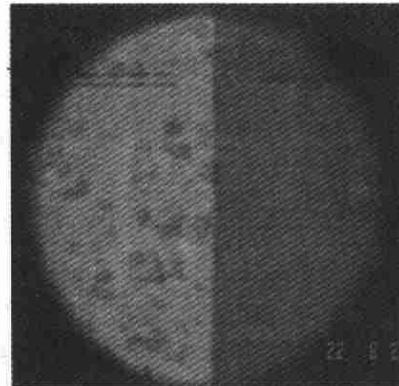


图 2 在光学显微镜下键合界面的照片($\times 600$)
Fig. 2 Photograph of the bonding interface observed under optical microscope($\times 600$)

热键合后晶体的键合面经宏观检查没有气泡、开裂产生。将垂直于键合面的晶体表面作一般抛光后放在光学显微镜下观察,键合界面被放大 600 倍的照片如图 2 所示。因掺 Nd^{3+} 的 YAG 晶体与纯 YAG 晶体的颜色不同,所以能清楚地观察到两晶体的键合界面。此外,在图上也看到了许多斑点,这是由于我们只是为了观察键合界面,仅对表面进行了粗抛光形成的麻点。

将热键合后的 YAG/Nd:YAG 复合晶体平行于键合面的两个表面再进行定向抛光,厚度为 4mm。使用 PE lambda 900 分光光度计,入射光垂直于键合面,测量 YAG/Nd:YAG 复合晶体在 775 ~ 1100nm 的透过率曲线。同时,为了比较,我们也测量了 YAG/Nd:YAG 晶体光胶前(没有光胶,只是简单叠加在一起,存在四个反射面)的透过率以及与复合晶体有相同厚度(4mm)的一块 Nd:YAG 晶体的透过率。测试实验在室温下进行。

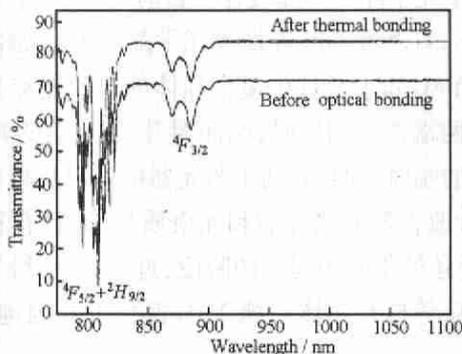


图 3 YAG/Nd:YAG 晶体光胶前和热键合后的透过率曲线
Fig. 3 Transmission spectra of the YAG/Nd:YAG crystals before optical bonding and after thermal bonding

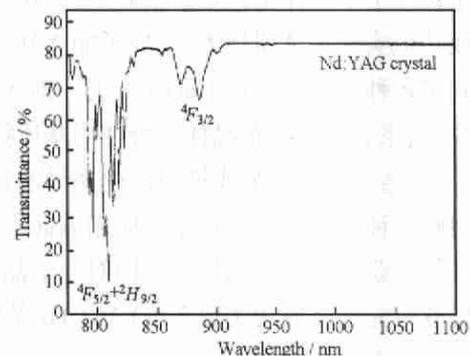


图 4 Nd:YAG 晶体的透过率曲线
Fig. 4 Transmission spectrum of the Nd:YAG crystal

3 结果与讨论

图 3 为 YAG/Nd:YAG 晶体光胶前(没有光胶,只是简单叠加在一起,存在四个反射面)与热键合后的透过率曲线,其中每种晶体测量三个点。图 4 为入射光通过一块与复合晶体相同厚度 Nd:YAG 晶体的透过率曲线。从图中可看出, Nd^{3+} 离子在 900 ~ 1100nm 波长范围内有二个吸收带,其吸收峰的重心波长分别为 805nm 和 878nm,分别对应于基态 $^4I_{9/2}$ 到 $^4F_{5/2} + ^2H_{9/2}$ 和 $^4F_{3/2}$ 的吸收跃迁, 1090nm 在晶体的非吸收波段范围内。

YAG 晶体的 Sellmeir 方程为^[8]:

$$n_{\text{YAG}(\lambda)}^2 = 2.08745 + \frac{1.2081\lambda^2}{\lambda^2 - 0.02119} + \frac{17.2049\lambda^2}{\lambda^2 - 1404.45} \quad (1)$$

其中 λ 为入射光的波长,单位为 μm 。计算得到在 1090nm 处 YAG 折射率 n 为 1.8173,因本实验中 Nd:YAG 晶体的 Nd^{3+} 离子浓度仅为 1% 原子分数,这样的掺杂浓度对 YAG 晶体折射率变化的影响非常小,可忽略不计,所以 Nd:YAG 的折射率近似取为 YAG 的折射率。入射光垂直晶面的透过率公式^[9]:

$$T = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha d}}{1 - R^2 e^{-2\alpha d}} \quad (2)$$

其中 d 为晶体厚度, α 为晶体吸收系数, $R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}$, 表示入射光垂直经过晶体表面的反射系数。在 1090nm 处 Nd:YAG 晶体的 α 等于零, $R = 8.4158 \times 10^{-2}$ 。通过计算可得到在 1090nm 处,入射光通过光胶前(考虑存在四个反射面)的 YAG/Nd:YAG 晶体透过率理论值为 71.4%,通过一块 Nd:YAG 晶体时的透过率理论值为 84.5%,结果如表 1 中所示。

表 1 YAG/Nd:YAG 晶体与 Nd:YAG 晶体的透过率

Table 1 Transmission of the composite YAG/Nd:YAG and Nd:YAG crystals

Crystals	YAG/Nd:YAG (before optical bonding)	YAG/Nd:YAG (after thermal bonding)	Nd:YAG
Theoretical value	71.4%		84.5%
Transmission ratio	72.63%, 72.55%, 72.58%	84.98%, 84.51%, 84.51%	84.68%, 84.86%, 84.44%
Experimental value	$\bar{T} = 72.6 \pm 0.3\%$	$\bar{T} = 84.7 \pm 0.3\%$	$\bar{T} = 84.7 \pm 0.3\%$

透过率实验值的测量结果如表 1 中所示。测量中由于晶体表面抛光、仪器以及测量造成的误差被估计约为 $\pm 0.3\%$ 。YAG 与 Nd:YAG 晶体在光胶前,1090nm 入射光垂直经过它们时透过率的平均值为 72.6%,与考虑有四个反射面计算得到的透过率理论值 71.4% 相接近。热键合后复合晶体的透过率实验值达到 84.7%,比光胶前增加了 12.1%,键合后晶体的透过率有了非常大的提高,与通过一块 Nd:YAG 晶体的透过率理论值 84.5% 相一致。这些数据可以说明,复合晶体的反射面已由光胶前的四个变成了两个,热键合后有两个反射面消失了。

YAG 与 Nd:YAG 晶体在键合界面处仍属两种介质,存在的折射率之差,会造成一定的反射;此外,键合界面上存在的杂质损伤及非均匀过渡界面也会造成散射^[11,10]。但从上面的测试结果来看,在误差范围内,热键合后的晶体与一块 Nd:YAG 晶体的透过率实验值相等,均为 84.7%。可见由于上述两方面原因造成的复合晶体透过率损失非常小,在我们现有仪器的测量精度范围内已经测不出来。因此从透过率的角度来看, YAG 与 Nd:YAG 晶体因折射率相差很小,其键合界面对透过率的影响可忽略;另外键合面也几乎不存在杂质和损伤,其键合区域为均匀过渡,基本上无散射界面存在,可以认为实现了一体化。

由于晶体的键合面均为同一方向的晶面,经精密的光学加工,得到很高的平行度和光洁度,表面经清洁处理,两键合面间无间隙,可以在大气压的作用下形成光胶。也有人认为光胶是由于晶面经严格的抛光及处理后,获得的亲水性表面依靠氢键的作用在室温下相互吸引所形成的^[1]。仅用光胶方法得到的这种结构在受热不均匀的情况下很容易脱开,因此还需进一步高温键合。热键合过程中,光胶后的晶体在低于熔点的温

度和适当的压力下,表面悬键经过一定时间的调整和重构,能够相互联接;此外,还有离子和空穴在交界面上的扩散机制在起作用。因此经过足够的时间,最后可以形成一个稳定的、永久性的键合结构。

如在掺杂激光晶体两端键合上不掺杂的同质晶体,并把两个端面加工镀膜后作为特殊的反射、耦合镜面,将实现谐振腔的全固化,可省去谐振腔的前后反射镜,由此能把谐振腔对激光器造成的不稳定性减到最小。它将具有免调整、强的抗机械结构变形和机械振动能力以及抗空气扰动能力,还有体积小、散热能力强等优点。因此这种复合结构的晶体元件用于激光系统中可改善激光热性能和光束质量,有利于激光系统的稳定和实现高功率激光输出。我们实验室已在 Yb:YAG、Nd:YAG 及 Tm:YAG 的两端成功键合不掺杂 YAG 端帽,以后将陆续报道相关研究和激光实验。

4 结 论

在一定的热压条件下,通过热键合技术获得了 YAG/Nd:YAG 复合激光晶体。测试及计算结果表明,这种复合结构的透过率与单一的 Nd:YAG 晶体透过率的理论及实验值在误差范围内相等,键合面对晶体透过率没有影响。从透过率的角度来看,可以认为 YAG 与 Nd:YAG 晶体之间已良好的键合,实现了一体化。

参 考 文 献

- [1] 吕静姝,闫平,巩马理,柳强. 热键合技术及其在激光方面的应用[J]. 光学技术, 2002, **28**(4):355-359.
- [2] Pavel N, Saikawa J, Taira T. Radial-pumped Microchip High-power Composite Yb:YAG Laser: Design and Power Characteristics[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, **40**:146-152.
- [3] Honea E C, Beach R J, Mitchel S C, et al. High-power Dual-rod Yb:YAG laser[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(11):805-807.
- [4] Tsunekane M, Taguchi N, Inaba H. High Power Operation of Diode-end Pumped Nd:YVO₄ Laser Using Composite Rod with Undoped End[J]. *Elect. Lett.*, 1996, **32**(1):40-42.
- [5] Bibeau C, Beach R J, Mitchell S C, et al. High-average-power 1 μ m Performance and Frequency Conversion of a Diode-end Pumped Yb-YAG Laser[J]. *IEEE J. Quan. Elect.*, 1998, **34**(10):2010-2019.
- [6] Sugiyama A, Fukuyama H, Sasuga T, et al. Direct Bonding of Ti:Sapphire Laser Crystals[J]. *Applied Opt.*, 1998, **37**(12):2407-2410.
- [7] Honea E C, Beach R J, Sutton S B, et al. 115W Tm:YAG Diode-pumped Solid-state Laser[J]. *IEEE J. Quan. Elect.*, 1997, **33**:1592-1560.
- [8] Zelmon D E, Small D L, Page R. Refractive-index Measurements of Undoped Yttrium Aluminum Garnet from 0.4-5.0 μ m[J]. *Applied Opt.*, 1998, **37**(21):4933-4935.
- [9] Jin B M, Kim I W, White W B, et al. Modification of UV-VIS Optical Absorption Properties Caused by MgO Incorporation in MgO-doped LiNbO₃ Crystals [J]. *Mater. Lett.*, 1997, **30**:385-388.
- [10] Lee H C, Brownlie P L, Meissner H E, et al. Diffusion Bonded Composite of YAG Single Crystals[J]. *SPIE*, 1991, **1624**:2-10.

(上接第 237 页)

- [8] 朱和国,王恒志,吴申庆. Al-TiO₂ 系热扩散反应合成 Al₂O₃, Al₃Ti/Al 复合材料的磨损性能研究[J]. 摩擦学报, 2002, **22**(1):19-22.
- [9] Mondolfo L F. Aluminum Alloys Structure and Properties [M]. Butterworths, 1976:373.
- [10] Nakata H, Choh T, Kane N. Fabrication and Mechanical Properties of in Situ Formed Carbide Particulate Aluminum Composites [J]. *Journal of Materials Sciences*, 1995, **30**:1719-1727.
- [11] Tjong S C, Ma Z Y. Microstructural and Mechanical Characteristic of in Situ Metal Matrix Composites[J]. *Materials Science and Engineering*, 2000, **29**: 49-113.
- [12] Mark Eston, David Stjohn. Grain Refinement of Aluminum Alloys: Part 1. The Nucleant and Solute Paradigms-a Review of the Literature [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1999:1613-1633.
- [13] 于化顺,闵文辉,陈熙琛. 固体粒子进入熔体的条件及影响因素[J]. 复合材料学报, 2000, **17**(3):113-115.
- [14] 李国军,黄校先,郭景坤. Al₂O₃ 基金属陶瓷界面润湿性的改善[J]. 材料导报, 2001, **15**:33-34.
- [15] Tee K L, Li L, Lai M O. In Situ Cast Al-TiB₂ Composites: Processing and Mechanical Properties[J]. *Materials Sciences and Technology*, 2001, **17**:201-206.