

光波导激光陶瓷的研究进展与展望

李江, 姜楠, 葛琳, 赵玉

中国科学院上海硅酸盐研究所透明光功能无机材料重点实验室, 上海 200050

摘要 未来二极管抽运固体激光器的重要发展方向是实现“三高”,即高功率、高效率和高光束质量的激光输出,而热效应将严重影响固体激光器的激光性能。作为极具发展前景的增益介质材料,激光陶瓷具有连续激光输出能力强、热导率高、可以高浓度掺杂等优点,并且容易实现大尺寸、批量化以及复合结构样品制备,而复合结构的增益介质可以有效改善固体激光器的热效应。其中,通过在激光陶瓷中制备光波导结构,可以高效散热、提高抽运效率,获得紧凑且具有高增益的激光系统,该类激光陶瓷有望解决“三高”固体激光器的核心问题。对光波导激光陶瓷的研究进展及其设计原理、制备方法和材料性能做了综述和介绍,最后对光波导激光陶瓷未来的研究做了展望和分析。

关键词 材料; 固体激光器; 光波导结构; 激光陶瓷; 研究进展; 展望

中图分类号 TQ129

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.030001

Research Development and Future Prospect of Optical Waveguide Laser Ceramics

Li Jiang, Jiang Nan, Ge Lin, Zhao Yu

*Key Laboratory of Transparent Opto-Functional Inorganic Materials, Shanghai Institute of Ceramics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*

Abstract One of the primary development directions of future diode-pumped solid-state lasers is to realize the "Three highs", namely, the laser output with high power, high efficiency, and high beam quality. However, the thermal effects will degrade the performance of laser device severely. As one of the most promising gain medium materials, laser ceramics have the advantages of strong continuous laser output, high thermal conductivity and high concentration doping. Meanwhile, laser ceramics are easy to achieve large size, batch production and composite structure sample preparation, while the gain medium with composite structure can effectively improve the thermal effect of solid-state lasers. The fabrication of optical waveguide structure in laser ceramics can efficiently dissipate heat, improve pumping efficiency and obtain compact laser system with high gain. This kind of ceramics will hopefully solve the core problem of "Three highs" solid-state lasers. In this paper, the research development, the design principle, the preparation techniques and the material properties of optical waveguide laser ceramics are reviewed and introduced. In the end, the future research of optical waveguide laser ceramics is prospected and analyzed.

Key words materials; solid-state laser; optical waveguide structure; laser ceramics; research development; future prospect

OCIS codes 160.3380; 230.7370; 140.3390; 140.3480

1 引言

自1960年梅曼研制出第一台红宝石固体激光器以来,激光技术发展迅猛,并广泛应用于军事、工

业、医疗等领域,如激光医疗、激光检测、激光雷达等^[1-2]。近十几年来,随着激光二极管(LD)抽运源和钇铝石榴石(YAG)激光基质的高速发展,采用激光二极管抽运的全固态激光器实现了高效率的激光

收稿日期: 2017-09-11; 收到修改稿日期: 2017-11-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0310500)、国家自然科学基金(61575212)

作者简介: 李江(1977—),男,博士,研究员,主要从事光学与光功能透明陶瓷方面的研究。E-mail: lijiaang@mail.sic.ac.cn

输出,与闪光灯抽运固体激光器相比,其效率提高了数十倍,同时还具有质量轻、结构紧凑、携带方便、易于维护等优点,在激光器市场占据着主导地位。此外,高功率全固态激光器因其在军事激光武器和工业加工等方面的潜在应用,已成为激光领域科研人员的研究热点之一^[3-5]。随着对激光器应用的不断拓宽,人们要求先进的固体激光器能够实现高功率、高效率、高光束质量的激光输出,且具有紧凑的系统结构。

激光增益介质是激光器实现能量转换、产生激光的核心,其直接影响着激光器的输出功率、光光转化效率、光束质量等。依据基质材料分类,固体激光增益介质包括激光单晶、激光玻璃和激光陶瓷。传统固体激光器所用增益介质主要是玻璃和晶体,由于玻璃的热机械性能差,导致其不适合用于高平均功率、高重复频率系统。激光晶体由于具有良好的热机械性能被广泛应用,但是,在未来的应用中,传统单晶很难克服其在成本和工艺上的缺陷。近年来,由于激光陶瓷的光学质量显著提高,并且获得了与单晶相当甚至高于单晶的高效率激光输出,因此备受瞩目。1995年,日本科学家 Ikesue 等^[6]首次利用原子数分数为 1% 的 Nd:YAG 陶瓷实现了 1.06 μm 处斜率效率达 28% 的连续激光输出,自此激光透明陶瓷作为性能优异的增益介质受到重视。2006 年美国利弗莫尔国家实验室利用日本神岛化学公司提供的大尺寸透明多晶 Nd:YAG 陶瓷(100 mm \times 100 mm \times 20 mm),并采用热容激光器的形式,实现了 67 kW 的最高功率激光输出,引起了国际上的广泛关注,从此激光透明陶瓷正式成为大功率固体激光器增益介质的主要候选材料之一,同时在国际上掀起透明陶瓷研究热潮^[7-8]。2009 年,美国诺格公司使用 Nd:YAG 陶瓷板条,通过相干合成技术获得了 105 kW 的激光输出^[9]。在同一时期,美国达信公司使用 Nd:YAG 陶瓷板条通过“ThinZag”激光系统实现 100 kW 激光输出,达到了激光武器的功率要求^[9]。激光陶瓷在国内也获得了高速发展,自从 2006 年中国科学院上海硅酸盐研究所制备的 Nd:YAG 激光陶瓷在国内首次实现连续激光输出后^[10],激光陶瓷又取得了重大进展。2013 年,上海硅酸盐研究所制备的大尺寸 Nd:YAG 陶瓷板条(120 mm \times 50 mm \times 3 mm)经中国科学院理化技术研究所验证,实现了 1064 nm 处 4350 W(国内最高值)的激光输出,光光效率为 43.6%,与同样参数的晶体板条激光模块输出功率相当^[11]。此外,国内科研人员在人眼安全波段陶瓷激光领域的研究也

取得了重大进展,包括 Tm:YAG^[12]、Ho:YAG^[13] 以及 Er:YAG^[14] 激光陶瓷等。除了稀土离子掺杂 YAG 激光陶瓷,目前受到广泛关注的激光陶瓷还有 Yb:Y₃ScAl₄O₁₂ (Yb:YSAG)^[15]、Yb:Lu₃Al₅O₁₂ (Yb:LuAG)^[16]、Nd:SrF₂^[17]、Yb:CaF₂^[18] 等,以及稀土离子掺杂倍半氧化物激光陶瓷 Y₂O₃^[19-20]、Sc₂O₃^[21]、Lu₂O₃^[19-20] 等。激光透明陶瓷作为新型的激光材料,不仅具有与激光单晶相媲美的激光性能,而且还能实现与激光玻璃相似的大尺寸制备和高浓度掺杂,尤其是陶瓷具有良好的高温机械性能和结构设计优势,被认为是 21 世纪最具有发展前景的激光材料之一。激光陶瓷的结构设计优势是指在制备过程中就可以实现不同组分、不同功能材料的结合,为激光系统设计提供了更多的空间。这样设计的目的可以有很多种,如提高激光增益介质的热传导、优化材料内部的热分布、去除内应力等。

目前,制约固体激光器发展的一个重要因素是激光器在产生激光的同时会产生大量热量,即部分抽运光不能被增益介质吸收,而是以废热的形式释放,将导致严重的热效应。热产生的方式可归纳为以下 4 点^[22]:1) 荧光过程的量子效率低于 1,包括激光跃迁在内,因而有些光子把它们的全部能量散失到基质晶格;2) 固体激光工作物质的抽运能级与亚稳态能级通过非辐射跃迁,将能量传给基质材料;3) 非匹配波长上的能量吸收:除有效抽运的抽运光源,其他光谱波段主要分布在紫外和红外区,直接被基质材料大量吸收,此时这些光谱的能量都转换为热量;4) 固体激光工作物质中部分受激辐射又被再吸收,从而变为热能。与此同时,由于固体增益介质没有流动性,内部产生的热量仅能通过表面进行散热,表面制冷的方式将使得增益介质在高功率激光输出的情况下产生较大的温度梯度,进而导致热应力效应、热透镜效应、热致双折射效应以及热致退偏效应等,限制了激光器的输出功率,降低了激光的光束质量,甚至可能导致固体激光增益介质的破坏。

近年来,为了改善激光介质的热效应,研究人员从热源头出发,通过直接设计复合结构增益介质,或利用材料之间的热传导差异来促进散热,以降低热效应对材料和激光光束质量的影响。目前,复合结构激光陶瓷主要包括两层复合^[23]、三层复合^[24]、梯度掺杂^[25]、同轴夹心棒状^[26]以及平面波导结构^[27]等,不同复合结构的激光陶瓷以主动方式来提高激光工作物质的散热能力,在不增加或较小程度影响器件结构复杂性的前提下,通过降低热效应来提高

激光光束质量。

在各种不同的复合结构激光陶瓷中,波导结构激光陶瓷具有大的数值孔径(NA),可以很好地约束非衍射极限的光束,有效防止自由空间发散,对抽运光吸收效率高。此外,该结构具有很好的散热能力,可以及时传导激光发射中产生的废热,因此能够更有效地克服热效应。因此,波导结构可以使激光器实现高效率、高功率的激光输出,同时,又保证了高光束质量,是一种比较理想的全固态激光器的增益介质结构^[28]。此前,科研人员利用薄膜沉积^[29-30]、离子注入^[30]、热键合^[31]以及飞秒激光写入^[32]等技术,在稀土离子掺杂的 YVO_4 ^[33]、 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ^[34]、 KTiOPO_4 (KTP)^[35]、 YLiF_4 (YLF)^[36]以及 $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (GGG)^[37]等多种激光晶体中制备出了光波导,并实现了激光输出。目前,用于激光增益介质的透明陶瓷受到了高度重视,其中针对YAG基激光陶瓷的研究最为成熟。随着近年

来波导激光器的发展,针对不同的应用需求,波导激光陶瓷的结构设计更加多元化。此外,波导激光陶瓷的制备技术也得到不断发展。

2 光波导的光学理论基础及结构类型

2.1 光波导原理

光波导的原理是基于斯涅尔定律,即当光以大于临界角的角度由折射率大的介质入射到折射率小的介质时,将发生全反射,入射光全部反射到折射率大的介质并在其内部经过多次全反射传播,而折射率小的介质内将没有光透过。以典型的平面波导为例,如图1所示,它由三层介质组成,中间为波导层,一般厚度为 $5\sim 200\ \mu\text{m}$,折射率为 n_2 ,上面覆盖层的折射率为 n_3 ,下面衬底层的折射率为 n_1 。为了实现光波导,必须满足 $n_3 \leq n_1 < n_2$,当覆盖层与衬底层材料相同(即 $n_1 = n_3$)时,称为对称平面波导。当 $n_3 < n_1 < n_2$ 时,则称为非对称平面波导。

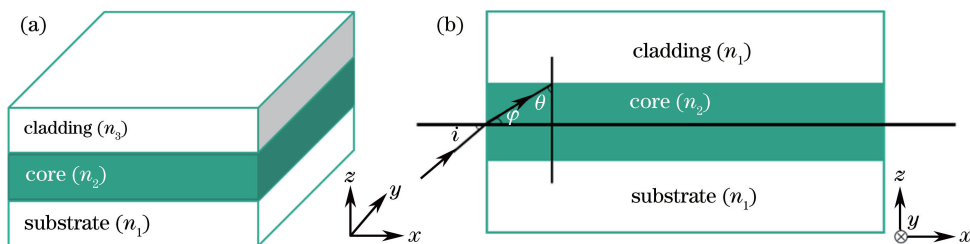


图1 (a)非对称平面波导($n_2 > n_1 > n_3$)和(b)对称平面波导的折射率剖面图及芯层中光路传播示意图

Fig. 1 Geometry of (a) asymmetric planar waveguide ($n_2 > n_1 > n_3$) and (b) symmetric planar waveguide with its refractive index profile and a propagating light ray in its core

对于对称平面波导,在芯层-包层界面处全反射的临界角 φ_c 要满足以下关系式:

$$\varphi_c \geq \varphi = \sin^{-1}\left(\frac{n_1}{n_2}\right). \quad (1)$$

反射光随后会在芯层和包层的界面处发生连续的全反射,因此光将会在芯层中沿着长度方向传播。在芯层和折射率为 n_0 的介质(如空气)的界面处应用斯涅尔定律,对于一束入射角为 θ 的光线,应满足:

$$\frac{\sin i}{\sin \varphi} = \frac{n_2}{n_0} = \frac{\sin i}{\cos \theta}, \quad (2)$$

从(1)和(2)式可以得出这束光线在芯层-包层界面发生全反射的条件为:

$$\sin \theta < \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2}, \quad (3)$$

结合(2)和(3)式得到全反射的条件可以改写为:

$$\sin i < \frac{n_2}{n_0} \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2} = \sqrt{\frac{n_2^2 - n_1^2}{n_0^2}}. \quad (4)$$

如果 $(n_2^2 - n_1^2) > n_0^2$,则任何角度 i 的入射光均会在芯层-包层界面发生全反射。假设波导在空气中,则 $n_0 = 1$,入射光能够耦合进芯层的极限入射角 i_m 可以表示为:

$$\sin i_m = \sqrt{n_2^2 - n_1^2} = NA, \quad (5)$$

式中极限入射角 i_m 的正弦值被定义为数值孔径,在波导结构中,数值孔径是一个重要的参数,反应了抽运光的耦合效率,其值决定了耦合光的最大入射角。数值孔径与芯层和包层材料的折射率差 Δn 有关,从(5)式中可以看出,折射率差 Δn 越大,数值孔径越大。高数值孔径的波导特别适合采用二极管激光抽运,这是因为它可以捕获并限制抽运光的快速发散^[38]。目前,包层与波导层折射率差大于 10^{-4} 时便可实现光波导^[27]。

决定光波导在给定波长处传播模式的大小和数量的关键参数是波导层厚度 d 和数值孔径。平面波导中给定波长 λ 处所能支持的传播模式数 p 可

以定义为:

$$p = \frac{2d \cdot NA}{\lambda}, \quad (6)$$

当 $p \leq 1$ 时, 即其横向尺寸不大于 λ/NA 的一半时, 该波导是单模的。在单模波导中, 除了基模的传播模式, 其他的都将被截止。从(6)式可以清晰地看出, 对于给定的厚度 d , 波导层中的传播模式数可以通过减少数值孔径来实现最小化, 但是, 这种方法将会弱化光波导性能。另一方面, 在高数值孔径的波导中, 能够维持单模传播所要求的厚度更小。

通常波导层的厚度根据应用需求控制在几微米到几百微米。此外, 为了在激光增益介质中实现光

波导, 对材料还有一定的要求: 1) 包层与波导层材料的热膨胀系数要接近, 防止在抽运光辐照下产生热应力; 2) 包层材料对抽运光的吸收小, 整个激光增益介质材料对工作波段的激光应具有高透过性; 3) 包层与波导层的界面光滑平直, 减少光散射; 4) 包层材料的热导率高于波导层材料, 便于散热。

图 2 为不同温度、不同发光离子掺杂浓度下 Nd:YAG 和 Yb:YAG 晶体和陶瓷的热导率变化曲线^[39]。由图 2 可知, 随着掺杂浓度的提高, 材料的热导率逐渐降低。同时, 在相同的离子掺杂浓度下, 工作温度越高, 材料的热导率越低。此外, 化学组成相同时, 激光陶瓷的热导率与激光晶体相当或略高。

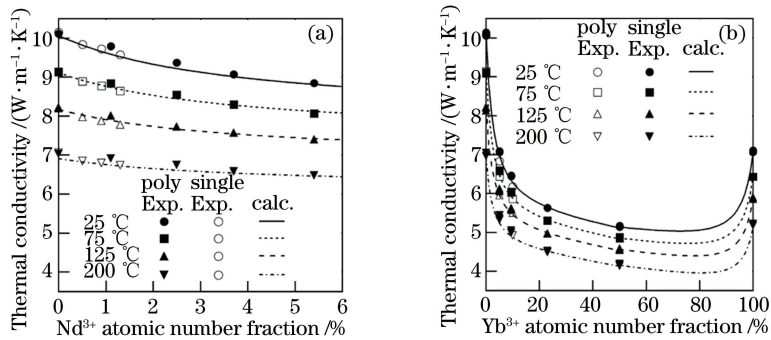


图 2 (a) Nd:YAG 和 (b) Yb:YAG 晶体和陶瓷的热导率^[39]

Fig. 2 Thermal conductivity of (a) Nd:YAG and (b) Yb:YAG crystal and ceramics^[39]

2.2 光波导类型

2.2.1 平面波导

平面波导按照折射率的变化可以分为折射率突变型光波导和折射率渐变型光波导, 即折射率呈阶梯状变化和缓慢变化, 两种类型波导的折射率分布及光传播方式如图 3 所示。图 3(a)所示的突变型光波导, 当入射光与衬底-波导层界面法线夹角 θ 大于全反射临界角时, 光在波导层中的界面处反复发生全反射, 以锯齿状路径传输。图 3(b)所示的渐变型光波导, 当光从上衬底-波导层界面射向波导层-下衬底界面时, 光线被连续地折射, 在传输过程中, 光线与传输方向所构成的角度发生平滑变化, 因而

光线沿圆弧形轨迹传输。

除了波导激光器本身在抽运耦合上的优势外, 平面波导激光器还具有大的横纵比, 可以采用高效的大面积散热方式, 而且与光纤激光器相比, 平面波导激光器只产生一维的热流方向和热梯度, 有利于确定双折射方向, 从而避免偏振损耗, 可以更有效地抑制热效应^[40]。

为了改善平面波导激光波导方向和非波导方向光束质量差异较大的缺点, 2000 年, Bonner 等^[41]借鉴双包层光纤的思路成功地制备出了双包层平面波导激光器, 用外包层束缚抽运光, 用内包层束缚激光, 进一步降低了对激光二极管抽运光光束质量的

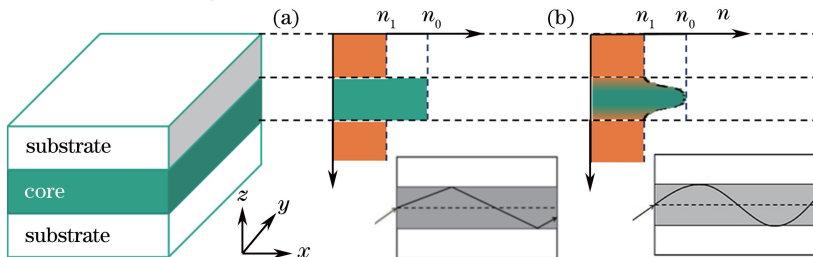


图 3 (a)突变型和(b)渐变型平面波导结构的折射率分布及光传播方式示意图

Fig. 3 Schematic of the light propagating and refractive index distribution in (a) mutational and (b) gradual waveguide structure

要求,使抽运效率得到很大的提高。随后他们通过改变抽运方式,使平面波导激光器的输出光束在两个垂直方向上达到了近衍射输出,激光光束质量 M^2 分别为 1.0 和 1.8^[42]。Raytheon 公司同样专注于平面波导结构激光器的研究^[43]。目前, Raytheon 公司采用双包层平面波导已经实现了功率为 16.1 kW 的激光输出,该激光器以 Yb:YAG 为波导层增益介质,并计划在单个平面波导激光器上获得 30 kW 的激光输出, Raytheon 公司的系列工作展示

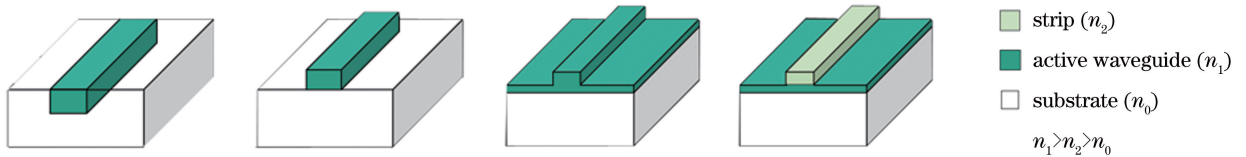


图 4 不同形式的通道波导。(a) 嵌入式; (b) 凸条型; (c) 脊型; (d) 加载条型

Fig. 4 Different types of channel waveguides. (a) Embedded; (b) strip; (c) rib or ridge; (d) strip-loaded

2.2.3 圆柱型波导

圆柱型波导中最经典的应用为双包层波导光纤,其结构如图 5 所示,折射率为 n_1 的材料被另一种折射率为 n_0 的材料包裹,其中 $n_1 > n_0$ 。

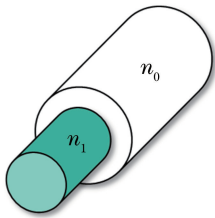


图 5 圆柱型波导示意图

Fig. 5 Schematic of cylindrical waveguide

光纤激光器中增益介质的表面积与体积的比是传统块状固体激光器的 1000 倍以上,因此具有出色的散热性能,此外还有光光转换效率高、光束质量好、发热量小、抽运阈值低、易于维护以及紧凑轻量化等优点。

目前,美国 IPG 公司已经实现了 10 kW 的单模光纤激光输出,光束质量接近衍射极限。为了实现更高功率的光纤激光输出,需要将多个光纤激光器输出的光束合成为单一的光束,近年来,多模光纤激光器的输出功率已达 100 kW 量级^[45]。同时,随着输出功率的增加,也将引起光束质量的快速下降。

石英光纤作为目前研究较成熟的光纤增益介质基质,其输出功率已经超过 3 kW。然而,由于石英玻璃的热导率较低 [$1.37 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$],低损伤阈值和严重的非线性效应限制了其在更高功率上的应用。YAG 的热导率高达 $11 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,单根稀土离子掺杂 YAG 光纤可以产生和承受更高的功率,

了平面波导结构在高功率激光器的应用前景^[44]。

2.2.2 通道波导

如图 4 所示的平面波导只能在 Z 方向上对光强有限制作用,是结构最简单和最常用的光波导。而在某些实际应用中,需要在 Z 、 X 两个方向上限制光的传播,即通道光波导。通道型波导避免了平面波导在非波导方向的衍射和扩散现象。通道波导主要有凸条型波导、脊型波导、嵌入式波导和加载条型波导等结构,其结构示意图如图 4 所示。

不会因为热效应产生光束质量的下降甚至损坏增益介质。此外,稀土离子掺杂 YAG 光纤具有更高的受激布里渊散射增益阈值。YAG 单晶光纤主要可以通过激光加热基座生长法^[46]和微下拉法^[47]等方法获得。相对于单晶光纤,陶瓷光纤的烧结温度较低,结合陶瓷成型工艺,可以实现直径小于 $100 \mu\text{m}$ 的激光陶瓷光纤的制备。因此,激光陶瓷光纤将成为未来激光增益介质发展的重要趋势之一。

3 光波导激光陶瓷的制备工艺及性能

为了充分开发陶瓷波导激光的潜在应用,其中一个重要环节是制备技术,主要包括形成波导的技术和激光增益介质材料的发展。光波导激光陶瓷的制备方法可以分为两类。

一类是通过改变激光增益材料本身折射率的制备技术,主要有离子注入技术和飞秒激光写入技术。离子注入技术在很长时间内是制备波导激光增益介质的主要方法,它对材料的要求低,除玻璃和晶体外,目前已经可以在陶瓷中实现光波导^[48]。近年来,可实现三维立体微加工的飞秒激光写入技术将波导激光的发展推向高潮,并逐渐成为制备波导激光陶瓷的关键技术^[49-59],此类方法更易实现近衍射极限的单模激光输出。

另一类是通过组合不同折射率材料获得波导结构的制备方法,主要有热键合技术和陶瓷成型结合共烧结技术。热键合技术工艺相对简单,成为制备高质量双包层波导激光器的重要方法^[27]。流延成型作为一种精度高、厚度可控、可连续化生产的成型

工艺在复合结构激光陶瓷制备中得到了广泛的应用^[60]。此外,挤出成型结合烧结工艺使得激光陶瓷光纤的制备成为可能。

3.1 折射率改变型光波导激光陶瓷的制备方法及其性能

3.1.1 离子注入/快重离子辐照

高能离子注入^[38]是一种材料改性和掺杂技术,最早应用于金属表面改性与半导体掺杂中。其过程是将离子通过高压电场,加速成高能量(几百 keV 至几 MeV),注入衬底材料,与材料中的原子或分子发生一系列相互作用,入射离子逐渐损失能量,最后停留在材料中,使材料表面成分、结构和性能发生变化,从而改变材料表面的一些物理、化学、光学或者机械性能。对于波导激光陶瓷而言,其作用机理^[61]是高能离子不断与衬底材料的原子核以及核外电子发生碰撞,并因能量逐步消失而停止,造成晶格损伤或改变材料的自发极化行为,从而改变材料的折射率,在一定区域形成波导。与普通离子注入相比,快重离子辐照是将相对原子质量较大的离子加速到几十到几百 MeV 甚至几 GeV 的能量轰击至靶材表

面,其需要的剂量要远远小于普通离子注入,从而有效缩短了制备成本与时间。

2012年, Tan 等^[62]在室温下采用 6 MeV 的 C^{3+} 离子注入获得了波导层厚度约为 $3.4 \mu m$ 的平面波导结构 Nd:YAG 激光陶瓷,并使用 808 nm 抽运光对波导进行抽运,实现了 1064 nm 波导激光输出。该激光输出的斜率效率为 11%,抽运阈值为 19.5 mW。2013年, Tan 等^[63]又采用重离子 C^{5+} 辐照方法配合金属盖板制备了 Nd:YAG 陶瓷激光波导放大器,图 6(a)为波导制备实验装置示意图,结果表明,获得的材料具有增强的发光性能和优异的波导性能,在 810 nm 激光激发下实现了 1064 nm 处 26.3 dB/cm 的信号增益。采用相同的制备工艺, C^{5+} 离子辐照制备的条形波导 Nd:YAG 激光陶瓷实现了抽运阈值 40 mW、斜率效率 56% 的连续激光输出^[64]。随后, Tan 等^[64]使用石墨烯作为可饱和吸收体,采用被动调 Q 技术实现了脉冲激光输出,获得的脉冲能量约为 10.5 nJ,脉冲持续时间为 60 ns。该激光装置示意图如图 6(b)所示。

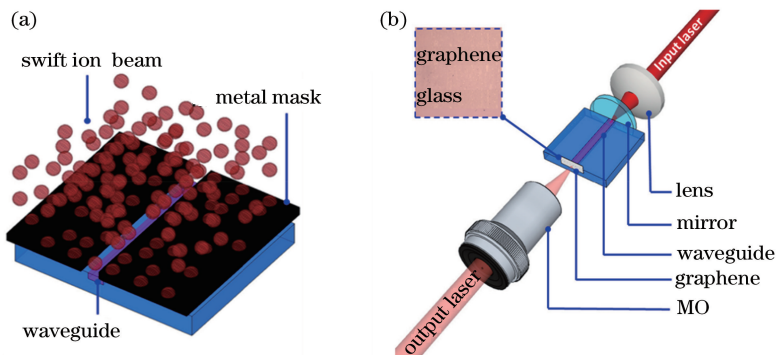


图 6 (a)重离子 C^{5+} 辐照方法配合金属盖板的实验装置示意图;(b) Nd:YAG 陶瓷波导的脉冲激光振荡实验装置示意图,插图为石墨烯可饱和吸收体的微观照片

Fig. 6 (a) Schematic of the experimental setup for the heavy swift ion C^{5+} ion irradiation with metal mask; (b) schematic of pulse laser oscillation experimental setup for Nd:YAG ceramic waveguide, the inset shows the microphotograph of the graphene saturable absorber

Yao 等^[65]采用质子束和 He^+ 离子束写入的方法,使用不同的注入通量在 Nd:YAG 透明陶瓷中实现了高质量的通道波导结构。实验表明,当 He^+ 离子的写入通量为 $2.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 时,成功地改变了样品的折射率分布,最大折射率改变值为 1.4×10^{-3} 。

离子注入技术加工精确度高,使用的温度范围广,可选材料种类多,可控和可重复性强,在光波导制备中得到了广泛的应用。然而离子注入需要昂贵的设备,并且目前无法制备大尺寸复杂器件,因此限

制了其发展。

3.1.2 飞秒激光写入

近年来,随着超短脉冲激光技术的发展,人们在探索更短波长的高功率激光与介质材料相互作用时发现,高功率的飞秒超短脉冲激光与透明电介质相互作用的过程会产生光致着色、永久性折射率变化、光致二次谐波产生、光致相变核破坏等现象^[66]。飞秒激光制作光波导是将飞秒激光直接聚焦到增益介质内部,通过激光与介质材料的相互作用以及介质材料内部不同方向、不同层次的扫描产生的内部微

结构来制作各种波导结构,因此,它可以实现真正意义上的三维立体加工^[67-68]。

飞秒激光写入光波导主要有 4 种类型^[68],如图 7 所示。I 型是在激光聚焦区域折射率增加;II 型

是间隔很近的两条直线形成折射率降低的位垒,中间为波导区;III 型是由中心区域被一系列低折射率的聚焦区域包围形成的;IV 型波导是利用超快激光烧蚀机制在基质上形成的脊型波导。

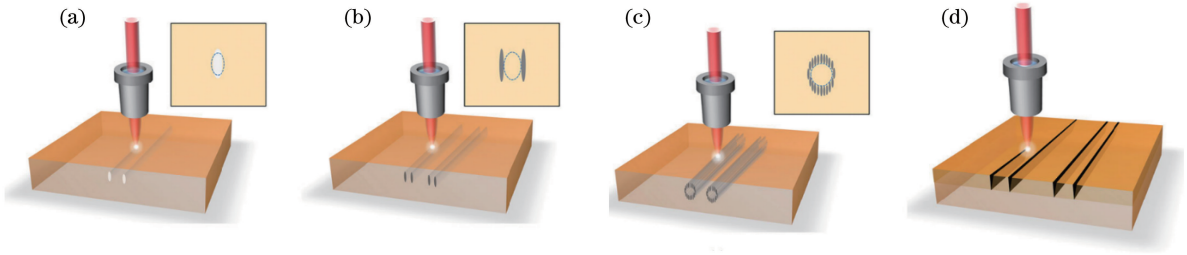


图 7 飞秒激光写入技术制备光波导晶体的 4 种类型^[68]

Fig. 7 Four types of optical waveguide crystals fabricated by femtosecond laser writing technology^[68]

Liu 等^[69]采用飞秒激光写入技术成功制备了六边形、圆形和梯形的 III 型波导结构 Nd:YAG 激光陶瓷,所获得的不同波导结构示意图如图 8 所示。他们通过共聚焦荧光测试探究了形成包层波导结构的物理机制,于圆形包层波导结构中实现了在 1064 nm 处最大输出功率约为 181 mW、斜率效率约为 44%、激光阈值为 121.1 mW 的激光振荡。

Calmano 等^[70]在原子数分数为 15% 的 Yb:YAG 激光陶瓷中得到了 II 型光波导,该激光陶瓷在 1030 nm 处实现了最大激光输出功率为 731 mW、抽运阈值为 230 mW、对应的斜率效率为 65% 的高效激光输出。

Salamu 等^[71]采用飞秒激光技术在原子数分数为 1.1% 的 Nd:YAG 陶瓷中实现了一种新型波导结构,其实验方案如图 9 所示,他们通过载物台以螺旋前进的方式移动增益介质,实现了直径为 100 μm 的圆包层 III 型波导。实验结果表明,激光介质螺旋移动的方案优于传统写入方案,当采用飞秒激光平行于激光介质的方案时,在 1.06 μm 和 1.3 μm 处分别获得了能量为 3.4 mJ 和 1.2 mJ 的脉冲激光输出。随后,他们采用相同的波导结构,同样获得了在 1.06 μm 处 0.48 W 的连续激光输出。当波导层直径为 50 μm 时,1.06 μm 处的脉冲能量提高到 4.1 mJ,对应的总光光转换效率为 31%。

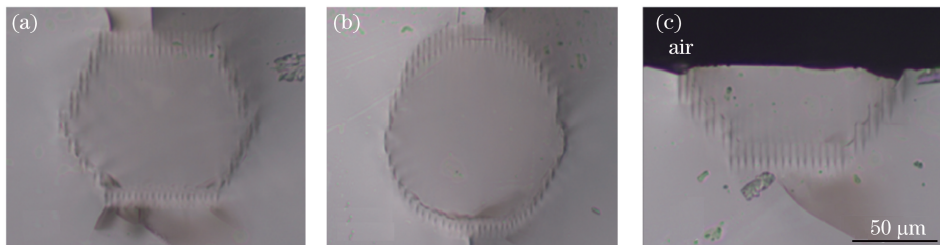


图 8 Nd:YAG 陶瓷(a)六边形、(b)圆形、(c)梯形包层光波导端面的光学显微镜照片

Fig. 8 Optical microscope images of the end surface of (a) hexagonal, (b) circular, (c) trapezoidal cladding waveguides of Nd:YAG ceramics

随后,Salamu 等^[72]采用相同的工艺制备了嵌入式圆包层波导,对比了逐线写入和螺旋写入两种方案,最终实现了瓦级的连续激光输出。实验结果表明,螺旋写入的波导结构的传播损耗为 0.6 dB/cm,优于传统写入波导的 1.7 dB/cm。此外,图 10 对比了两种不同方法制备的 III 型波导结构显微照片以及 807 nm 抽运下的端面照片和发光光斑图,螺旋写入的波导结构可以实现更好的抽运光约束以及更加对称的增益分布。在激光输出实验

中,他们采用这种新型波导结构在原子数分数为 1.1% 的 Nd:YAG 陶瓷中实现了 1.06 μm 和 1.3 μm 处输出功率分别为 3.1 W 和 1.6 W,对应的斜率效率分别为 43% 和 19% 的连续激光输出。在调 Q 激光实验中,他们以 Cr^{4+} :YAG 为可饱和吸收体,获得了平均功率为 680 mW、脉冲能量为 19.7 μJ 、峰值功率为 7 kW 的脉冲激光输出。

采用飞秒激光写入制备光波导,折射率结构的分辨率可以突破聚焦光束的衍射极限,对介质

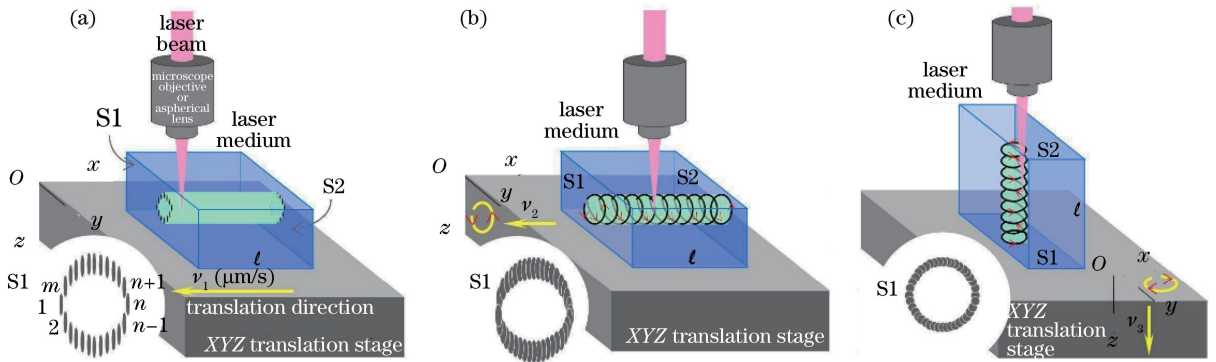


图9 三种飞秒激光直写技术。(a)沿着激光增益介质的横截面线性移动;(b)沿着激光增益介质的横截面螺旋前进;(c)平行于激光介质螺旋前进

Fig. 9 Three kinds of femtosecond laser direct writing technology. (a) Linear translation, transverse to the laser medium; (b) helical movement, transverse to the laser medium; (c) helical movement, parallel to the laser medium

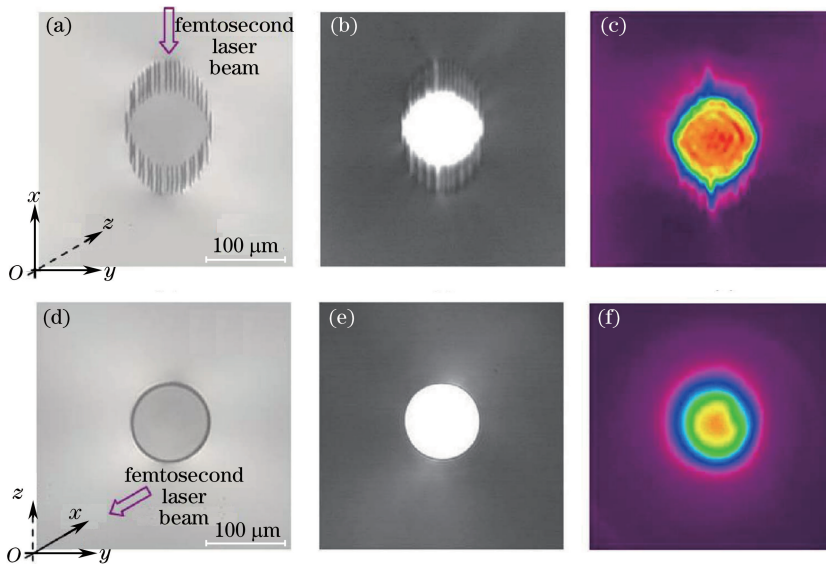


图10 (a)传统方法和(b)螺旋移动方法制备的直径为 $100 \mu\text{m}$ 的 III 型波导结构的显微照片;采用(c)传统方法和(d)螺旋移动方法时 807 nm 处低级别抽运下的端面照片;采用(e)传统方法和(f)螺旋移动方法时 807 nm 处低级别抽运下的发光光斑图

Fig. 10 Microscope photos of type III waveguide with the diameter of $100 \mu\text{m}$ fabricated by (a) traditional method and (b) end surface photos under low-pump level at 807 nm by helical movement method by using (c) traditional method and (d) helical movement method; luminescent spot diagrams under low-pump level at 807 nm by using (e) traditional method and (f) helical movement method

的损伤阈值低。同时设备简单,不需要真空超净环境以及复杂的光刻工序。但是直到现在该技术仍然停留在实验室研究阶段。

3.2 折射率组合型光波导激光陶瓷的制备方法及其性能

3.2.1 键合技术

键合是将波导层与包层材料的表面进行特殊处理并精细抛光,使两块材料能够靠范德瓦耳斯力结合在一起。键合技术是制备双包层波导结构激光器的重要方法。

Ter-Gabrielyan 等^[73] 首先采用无胶键合

(AFB)技术制备了 Er:YAG 条形波导激光,并且实现了输出功率为 9.1 W 、斜率效率达 92.8% 的单模激光输出,该结果接近衍射极限输出和量子亏损限制效率。随后,他们将获得的 YAG/Er:YAG/YAG 晶体再键合到尖晶石透明陶瓷中,得到了双包层 Spinel/YAG/Er:YAG/YAG/Spinel 结构,如图 11 所示。当采用端面抽运时,实现了在 1645 nm 处的最大输出功率为 25.4 W 、斜率效率为 56.6% 、光束质量 M^2 约为 2.6 的激光输出。

Ng 等^[74] 采用同样的方法制备了双包层 Spinel/YAG/Nd:YAG/YAG/Spinel 平面波导结

构材料,并实现了 946 nm 处高效的平面波导激光输出,获得材料的结构和激光波长的波导模式示意图如图 12 所示,其中 0.6% 为原子数分数。该激光输出的最大功率为 105 W,光光转换效率和斜率效率分别为 50% 和 54%,光束质量 M^2 为 $3.2(x \text{ 轴}) \times 2.4(y \text{ 轴})$ 。

将不同陶瓷键合在一起,需要尽量降低界面曲

线和界面污染,这对抛光水平和清洁程度提出了较高的要求。通常要将键合的材料进行精细抛光、化学处理以及采用一定的溶液清洗,之后最好在表面覆盖一层羟基,使其具有亲水性,增强键合材料表面之间的范德瓦耳斯力。同时,键合较薄的芯层与包层对材料本身的机械性能提出了较高的要求,这也是键合技术的一大难点。

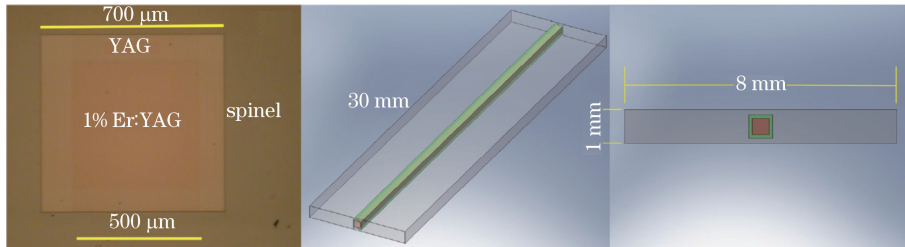


图 11 双包层 spinel/YAG/Er:YAG/YAG/spinel 条形波导结构示意图

Fig. 11 Schematic of spinel/YAG/Er:YAG/YAG/spinel strip waveguide structure with double-clad

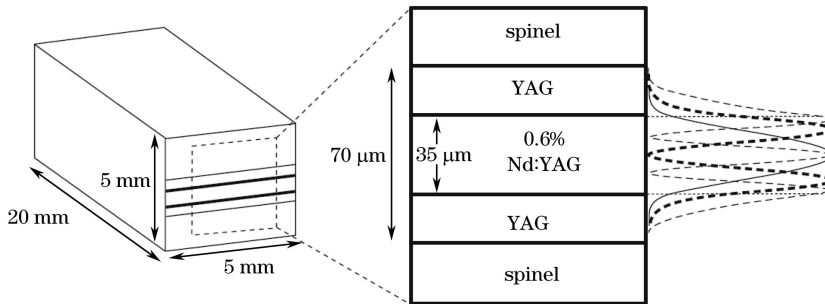


图 12 Spinel/YAG/Nd:YAG/YAG/spinel 双包层平面波导结构和在激光波长处的导模示意图

Fig. 12 Schematic of double-clad spinel/YAG/Nd:YAG/YAG/spinel double-clad planar waveguide and guided modes at the lasing wavelength

3.2.2 流延成型结合共烧结技术

1947 年,Howatt 等^[75]首次采用流延成型技术制备了陶瓷片层电容器。之后,流延成型广泛应用于陶瓷基板、陶瓷电容器、梯度结构材料、压电陶瓷、超导材料等领域。该成型方法精度高,制备的流延膜厚度可控,一般在几微米到几毫米范围内,适合叠层不同结构形式,可连续化生产。它不仅为电磁设备的微型化提供了广阔的前景,而且为工程陶瓷的宏观与微观结构设计提供了可能,为材料的性能优化提供了一条新途径。流延成型过程为:将混有陶瓷粉体、溶剂、分散剂、粘结剂、塑化剂等的浆料倾倒入流延机料槽中,通过载带的移动将浆料铺展为膜,溶剂从表面蒸发,获得流延膜;将流延膜切割裁剪,经过叠层、排胶、冷等静压、烧结,获得陶瓷。

流延成型工艺的主要优点是其可制备大面积、薄、平的陶瓷,这是其他方法很难做到的。比如在干压成型过程中,由于粉体在模具中的不均匀填充,会使素坯产生大量穿透的孔洞。而在波导激光陶瓷的设

计和制备中要求各种形状和尺寸的波导层流延膜,流延成型很容易满足这一要求。科研人员采用流延成型结合共烧结工艺已经实现了两层^[23,76-77]、三层^[78-81]以及梯度掺杂型^[23,82-83]复合结构激光陶瓷的制备。

Ge 等^[84]首次采用流延成型结合真空烧结工艺制备了 YAG/Nd:YAG/YAG 平面波导激光陶瓷,流延膜照片、微观形貌图及获得的平面波导激光陶瓷实物照片和透过率曲线如图 13(a)~(c)所示。随后,该团队系统研究了 Nd^{3+} 掺杂分布与烧结温度和保温时间的关系^[85],所制备的板条状平面波导 YAG/Nd:YAG/YAG 激光陶瓷作为激光放大器的增益介质,经中国工程物理研究院应用电子学研究所验证,获得了 100 Hz 重复频率下 327 mJ 单脉冲能量的激光输出,图 13(d)为对应的激光放大器系统示意图。此项工作获得的成就是国际范围内采用非水基流延成型方法制备的该种陶瓷平面波导所达到的最大单脉冲能量输出^[86]。

随后,经 Rao 等^[87]验证,平面波导 YAG/Nd:

YAG/YAG 陶瓷实现了在1064.6 nm 处的高功率激光输出。对于连续激光输出,激光实验装置及输出性能如图 14 所示。该激光输出的最大输出功率为 10.4 W,对应的光光转换效率为 59.8%。对于声光

调 Q 激光输出,平面波导 YAG/Nd:YAG/YAG 陶瓷在 10 kHz 的脉冲重复频率下获得了输出功率为 2.5 W、脉冲时间为 6.5 ns、峰值功率和脉冲能量分别为 38.5 kW 和 0.25 mJ 的激光输出。

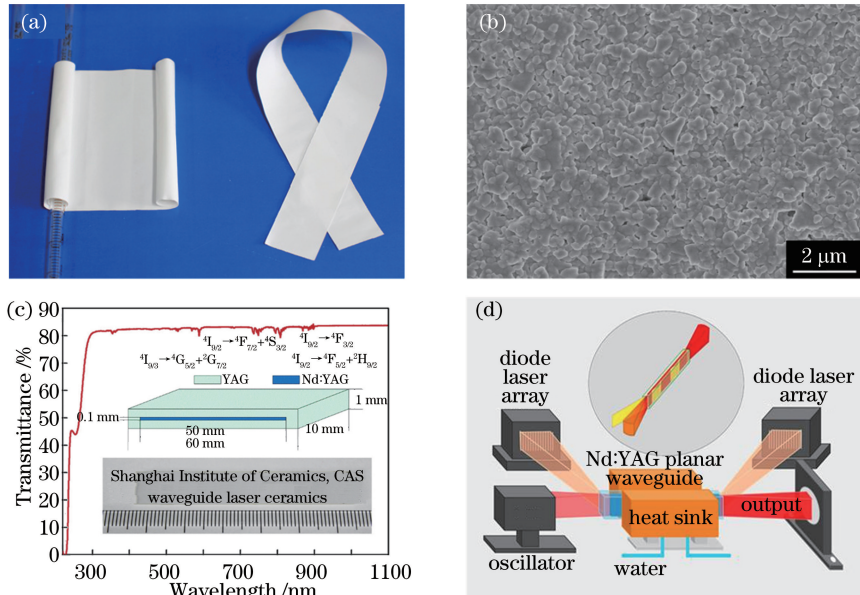


图 13 陶瓷流延膜的(a)实物照片和(b)表面的扫描电镜(SEM)形貌;(c)平面波导结构 YAG/Nd:YAG/YAG 透明陶瓷的实物照片和直线透过率曲线;(d)单通 YAG/Nd:YAG/YAG 陶瓷平面波导激光放大器系统示意图

Fig. 13 (a) Physical photograph and (b) surface SEM micrograph of the ceramic casting tape; (c) physical photograph and in-line transmittance of the planar waveguide YAG/Nd:YAG/YAG transparent ceramics; (d) schematic of the single-pass YAG/Nd:YAG/YAG ceramic planar waveguide laser amplifier system

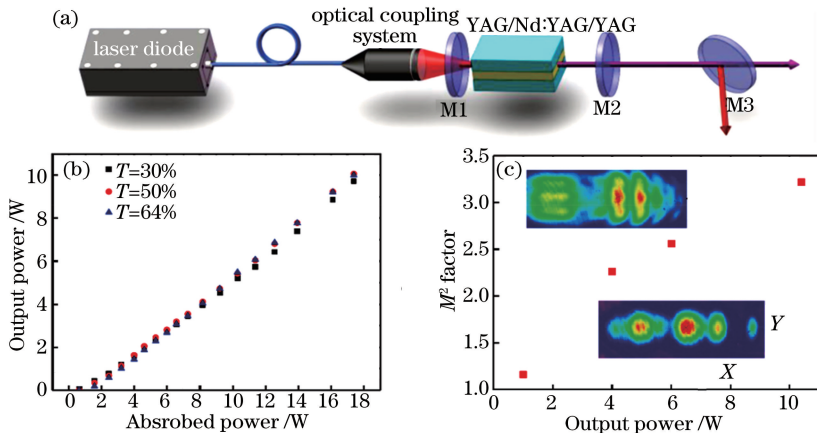


图 14 陶瓷平面波导激光的(a)装置示意图、(b)不同输出耦合镜(OC)透过率下的输出功率图和(c)不同输出功率下的光束质量因子。(c)图中的插图为 CCD 成像的光斑

Fig. 14 (a) Setup schematic, (b) output power under different output couplers and (c) beam quality factors under different output powers of the ceramic planar waveguide laser. The inset in Fig. (c) shows the beam spot imaged by CCD

Ma 等^[88]采用同样的方法制备了 YAG/Nd:YAG/YAG 平面波导激光陶瓷,在连续激光输出的情况下,所获得激光的最大输出功率为 840 mW,对应的斜率效率为 63%,抽运阈值为 160 mW。Lin 等^[89]采用被动调 Q 技术,通过将分色镜用墨烯氧化

物基的输出耦合镜取代,得到了稳定的脉冲输出。该激光输出的最短脉冲持续时间为 179 ns,在脉冲重复频率为 930 kHz 时,单脉冲能量为 221 nJ。

Yb:YAG 具有能级结构简单、单位面积增益高、荧光寿命长、吸收和发射带宽以及可以高浓度掺

杂等优点。此外,随着激光二极管的不断发展,抽运功率不断提高,解决了 Yb:YAG 抽运阈值高、不易抽运的缺点,使之成为高功率、高效率激光二极管抽运激光器的理想增益介质^[90]。

Zhao 等^[91]通过非水基流延成型结合固相反应烧结技术制备了高透明 YAG/Yb:YAG/YAG 平面波导陶瓷(其中 Yb:YAG 的原子数分数为10%),3.5 mm 的该陶瓷样品在 400 nm 处的透过率达到83.6%,陶瓷中 Yb³⁺ 沿厚度方向的扩散距离约为 215 μm 。

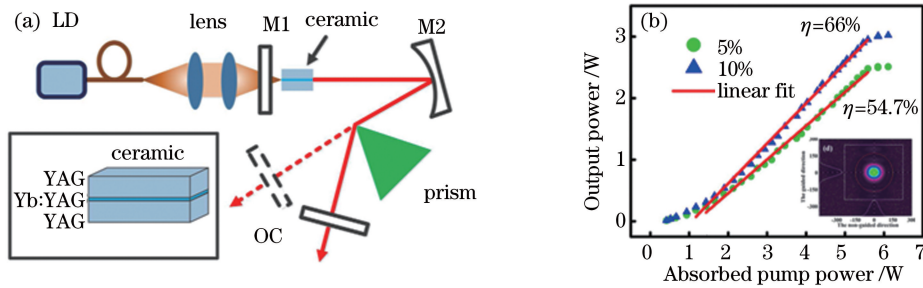


图 15 (a) YAG/Yb:YAG/YAG 陶瓷波导激光装置结构示意图;(b)三镜腔下采用不同透过率(5%和 10%)的输出耦合镜的平均输出功率,插图为模式轮廓图

Fig. 15 (a) Schematic of YAG/Yb:YAG/YAG ceramic waveguide laser setup; (b) average output power of three-mirror laser cavity with different transmissivity (5% and 10%), the inset shows the mode profile

平面波导特性在一定意义上是由波导层和包层的折射率之差决定的。而这种折射率之差取决于芯层和包层不同的掺杂浓度分布。图 16 为 Yb:YAG 的折射率与掺杂浓度关系图,可以看出,随着 Yb³⁺ 浓度的增加,Yb:YAG 的折射率线性增加。在烧结的过程中,激活离子不可避免地会从高浓度区域向低浓度区域扩散,因此有必要对波导结构中离子扩散分布进行研究,分析激活离子在波导层界面附近的分布,从而可以更好地指导平面波导激光陶瓷的优化制备。

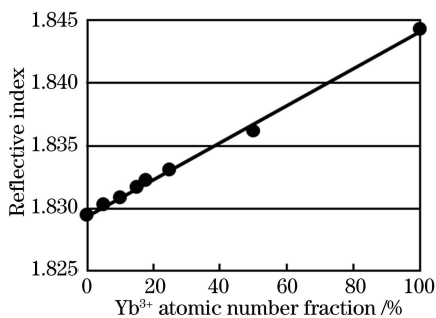


图 16 Yb:YAG 的折射率与 Yb³⁺ 掺杂浓度的关系图

Fig. 16 Relationship between the refractive index and Yb³⁺ doping concentration of Yb:YAG

因此,Liu 等^[93]对平面波导 YAG/Yb:YAG/YAG(其中 Yb:YAG 的原子数分数为10%)的掺杂离子浓度分布进行了研究,并采用 Fick 定律研究了

Wang 等^[93]采用尺寸为 $3.5 \times 3.5 \times 3.5 \text{ mm}^3$ 的平面波导 YAG/Yb:YAG/YAG 陶瓷实现了连续激光输出,当输出耦合镜的透过率为 10%时,激光的斜率效率高达 66%,输出功率为 3 W,三镜腔连续激光装置示意图和激光输出性能如图 15 所示。同时,他们采用半导体可饱和吸收镜实现了 1030 nm 被动锁模激光输出。该激光输出的平均功率为 385 mW,重复频率为 97.79 MHz,脉冲宽度为 2.95 ps,光束质量 M^2 为 1.1×1.42 。

Y 离子和 Yb 离子的扩散规律,拟合计算了各自的体扩散系数和晶界扩散系数。经计算,Y 离子和 Yb 离子的体扩散系数分别是 5.79×10^{-15} 和 7.16×10^{-15} ,晶界扩散系数分别为 2.25×10^{-7} 和 2.20×10^{-7} 。

人眼安全波段固体激光在医疗手术、人眼安全遥感及雷达、塑料加工、光电对抗等领域具有很好的应用前景,具有其他波段固体激光器不可替代的重要作用,如 Er:YAG^[94] 激光器可以代替高速涡轮牙钻,实施对牙体硬组织的切割;Ho:YAG^[95] 和 Tm:YAG^[12] 激光输出波长在 $2 \mu\text{m}$ 左右,与水的吸收峰接近,有极好的人体组织切割和凝血效果,是理想的手术激光光源。

为了实现 $2 \mu\text{m}$ 波段高功率、高效率和高光束质量的激光输出,上海硅酸盐研究所制备了高质量的平面波导 YAG/Tm:YAG/YAG 激光陶瓷,图 17 为激光实验装置示意图和不同输出耦合镜下的激光输出性能以及对应的激光光谱。以 785 nm 光纤耦合激光二极管为抽运源,当输出耦合镜透过率 T 为 1%时,在 10.3 W 的抽运功率下,实现了在 2013.76 nm 处最大功率为 173 mW、斜率效率 η 为 3.0%、光束质量 M^2 为 1.5 的激光输出^[96]。

据 Wu 等^[97]报道,YAG/Ho:YAG/YAG 平面波

导激光陶瓷在 Tm 掺杂光纤激光抽运下首次实现了 2091.4 nm 处的单纵模激光输出。所获得激光的输出功率为 530 mW, 对应的光光转换效率和斜率效率分

别为 6.6% 和 12.7%。随后, 他们通过改变校准器的角度实现了从 2091.1 nm 到 2092.1 nm 的波长调谐, 对应的调谐频率为 68 GHz, 光束质量 M^2 为 1.23。

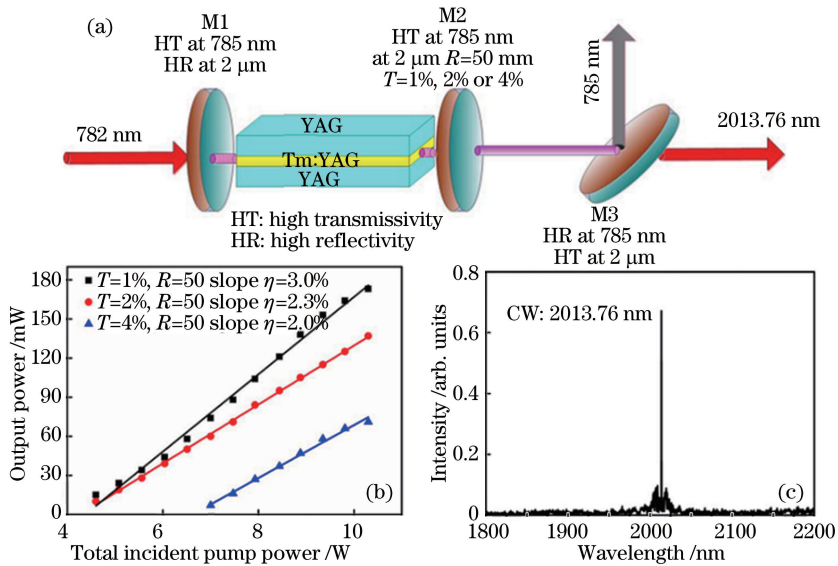


图 17 YAG/Tm:YAG/YAG 陶瓷平面波导激光的 (a) 实验装置示意图、(b) 不同输出耦合镜下的输出性能、(c) 输出光谱

Fig. 17 (a) Schematic of experimental setup, (b) output performance with different output mirrors,

(c) output spectrum of YAG/Tm:YAG/YAG ceramic planar waveguide laser

尽管 YAG 拥有比较高的热导率, 但是随着 Yb 离子浓度的增加, Yb:YAG 的热导率显著下降。然而, 当 Yb 离子掺杂的原子数分数高于 5% 时, Yb:LuAG 的热导率高于 Yb:YAG。因此, LuAG 是一种更合适的基质材料。Ma 等^[98] 采用不同的基质作为包层和波导层材料, 采用流延成型结合真空烧结技术制备了平面波导 YAG/Yb:LuAG/YAG 透明陶瓷。在 970 nm 二极管激光抽运下, 该材料的吸收效率为 85.4%。当抽运功率为 4.69 W 时, 最大输出功率为 288 mW, 对应的斜率效率和光光转换效率分别为 9% 和 5%。

3.2.3 挤出成型结合烧结工艺

在陶瓷粉末中加入溶剂、粘结剂和塑化剂使之成为具有可塑性的浆料, 通过特定的挤出装置, 调节挤压工艺参数(压力值、挤出口径和挤出速率等), 将获得的纤维混合物经干燥、排胶和烧结等工序后可获得激光陶瓷光纤。

Ikesue 等^[99] 采用挤出成型和固相反应烧结工艺制备了长度为 65 mm、直径为 900 μm 的 Nd:YAG 陶瓷光纤, 获得的样品实物照片和对应的激光输出性能如图 18 所示, 该陶瓷光纤在 10 W 的抽运功率下获得了约 1.2 W 的激光输出。此外, Ikesue 等^[100] 还制备了端帽结构的 Nd:YAG 陶瓷光纤, 其结构示意图和激光输出性能如图 19 所示,

当输出耦合镜透过率为 10% 时, 端帽结构的 Nd:YAG 光纤的输出功率约为 11.5 W。可以看出该工作所制备陶瓷光纤的直径在亚厘米量级, 不具备典型玻璃光纤的可弯曲性能。

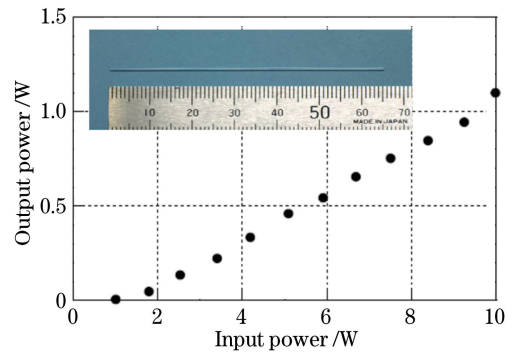


图 18 Nd:YAG 陶瓷光纤的激光性能和实物照片

Fig. 18 Laser performance and physical photograph of Nd:YAG ceramic fiber

近年来, 美国空军实验室的 Kim 等^[101-102] 和 Fair 等^[103-104] 开始了激光陶瓷光纤的研究。首先, 他们采用水基挤出成型的方法制备 YAG 陶瓷光纤。挤出成型获得 YAG 纤维素坯的过程如图 20 所示。在一系列的工作中, 通过对原料 YAG 粒径分布、挤出成型的压力以及不同烧结工艺和参数的研究, 最终制备出了具有较高光学质量的 YAG 透明陶瓷光纤[图 21(a)], 光纤直径约为 20 μm, 并且

可以进行弯曲、打结,如图 21(b)所示,其中弯曲半径为 3 mm。

由于晶界的存在,YAG 陶瓷光纤的表面比较粗

糙,这将会导致严重的表面散射。此外,当采用无包层光纤时,光纤与空气较大的折射率差异($\Delta n \approx 0.8$)将会加剧表面散射。采用折射率稍小于

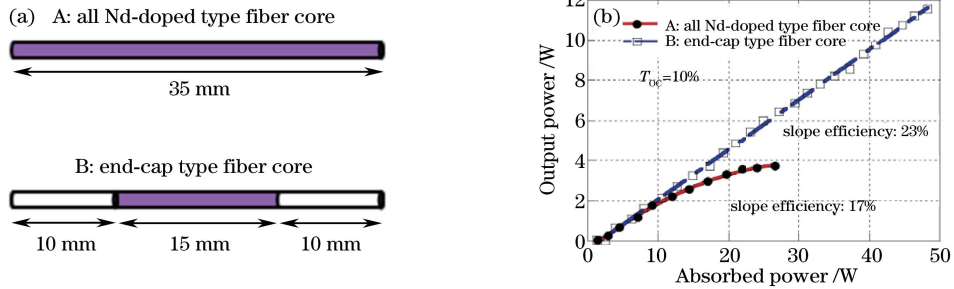


图 19 端帽结构 Nd:YAG 陶瓷光纤的(a)示意图和(b)激光性能

Fig. 19 (a) Schematic and (b) laser performance of the end-cap type Nd:YAG ceramic fiber

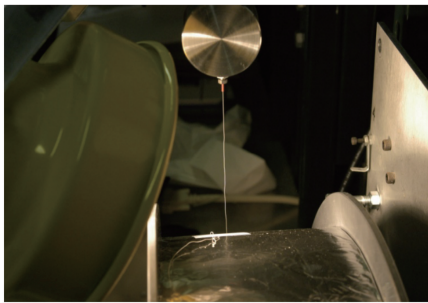


图 20 从直径为 125 μm 的喷嘴高压挤出的 YAG 纤维素坯

Fig. 20 YAG green fiber extruded from the high pressure nozzle whose diameter is 125 μm

光纤的包层有利于光波导和光学特性的提升。因此,随后 Kim 等^[105]实现了 SF57 玻璃包层 YAG 透

明陶瓷光纤的制备。图 22 展示了所获得玻璃包层的厚度和均匀性。在波长大于 800 nm 时,SF57 玻璃对于 YAG 光纤是一种有效的包层。

为了进一步减小光纤表面由于晶界起伏引起的散射, Kim 等^[106]对获得的 YAG 陶瓷光纤进行了表面抛光,抛光前后的 YAG 陶瓷光纤表面微观结构如图 23 所示。他们采用前期的工艺,制备了直径为 31 μm ,原子数分数为 1.5% 的 Ho:YAG 激光陶瓷光纤,其平均晶粒尺寸为 1.5 μm ,抛光后的散射系数由 76 m^{-1} 降低到 35 m^{-1} 。随后,他们对该陶瓷光纤采用 SF57 玻璃包层并进行了激光实验,实现了在 2091 nm 处最大功率为 701 mW、斜率效率为 7%、抽运阈值小于 500 mW 的激光输出。

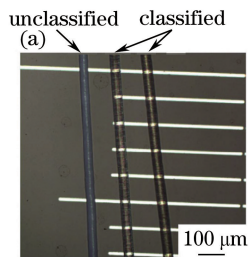


图 21 (a)采用筛选和未筛选 YAG 粉体制备的光纤的显微照片;(b)打环后的 YAG 光纤实物照片

Fig. 21 (a) Micrograph of fiber prepared with unclassified and classified YAG powder; (b) physical photograph of looped YAG fiber

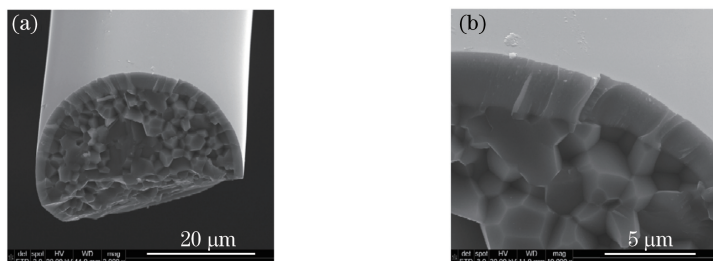


图 22 SF57 玻璃包层的 YAG 光纤 SEM 显微照片。(a) 3000 \times ;(b) 10000 \times

Fig. 22 SEM micrographs of SF57 glass cladding on YAG fiber. (a) 3000 \times ; (b) 10000 \times

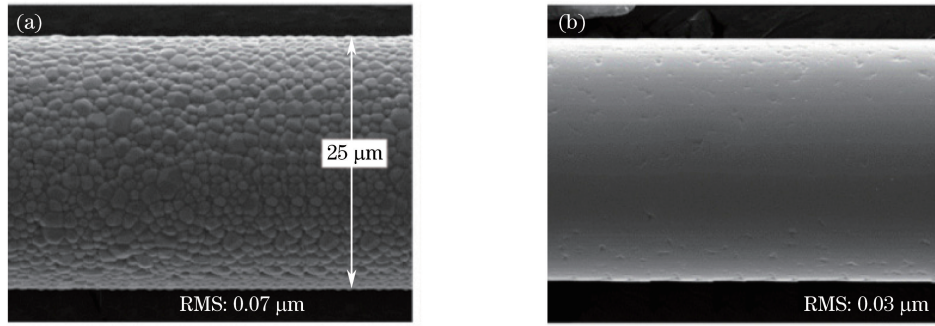


图 23 不同表面状态的 YAG 陶瓷光纤表面的 SEM 图像。(a) 烧结后; (b) 抛光后

Fig. 23 SEM micrograph of the surface of the YAG ceramic fiber with different surface state.

(a) After sintering; (b) after polishing

可以看出陶瓷光纤内部的光学散射损耗比较大, 需要进一步完善其制备工艺, 提高光纤的光学质量, 并最终获得高功率、高效率的陶瓷光纤激光输出。

表 1 汇总了近年来文献中具有代表性的陶瓷波导激光。从表 1 可以看出, Nd:YAG 体系仍旧是目前的研究热点。其中, 平面波导结构激光陶瓷在高功

率激光器中具有较好的应用前景。此外, 从平面波导陶瓷的激光性能上可以看出, 除了离子注入和飞秒激光写入等方法, 流延成型结合烧结工艺正成为越来越重要的技术, 考虑到其在成本和大尺寸平面波导陶瓷制备上的优势, 该工艺有望成为未来波导激光陶瓷的主要制备技术路线。

表 1 文献中获得的陶瓷波导激光性能汇总

Table 1 Summary of the properties of ceramic waveguide lasers obtained in the literatures

Gain medium	Fabrication technology	Waveguide configuration	Continuous-wave laser property					Beam quality M^2	Ref.
			Working wavelength / μm	Pump threshold / mW	Slope efficiency / %	Max output power / mW			
Nd:YAG ceramics	C ³⁺ ion implantation	Channel	1.064	19.5	~11	2.4	—	[63]	
Nd:YAG ceramics	Swift C ⁵⁺ ion irradiation	Channel	1.064	65	~56	—	—	[65]	
Nd:YAG ceramics	Femtosecond laser writing	Channel	1.064	68	60	80	—	[52]	
Yb:YAG ceramics	Femtosecond laser writing	Channel	1.03	230	65	731	—	[68]	
Nd:YAG ceramics	Femtosecond laser writing	Channel	1.064	121.6	~44	181	—	[70]	
Tm:YAG ceramics	Femtosecond laser writing	Channel	1.985	100	27	56.2	—	[55]	
Yb:YAG ceramics	Femtosecond laser writing	Double-cladding	1.03	392	62.9	80.2	—	[57]	
Nd:YAG ceramics	Femtosecond laser writing	Ridge	1.064	~64.9	42.5	46	—	[69]	
Nd:YAG ceramics	Femtosecond laser writing	Circular cladding	1.064, 1.3	—	43@1.06 μm ; 19@1.3 μm	3100@1.06 μm ; 1600@1.3 μm	—	[73]	
Spinel/YAG/Er:YAG/YAG/spinel	AFB	Double cladding	1.645, 1.617	—	56.6@1.645 μm ; ~13@1.617 μm	25400@1.645 μm ; 8050@1.617 μm	~2.6	[74]	
Spinel/YAG/Er:YAG/YAG/spinel	AFB	Double cladding planar	0.946	3000	54	105000	3.2×2.4	[75]	
YAG/Nd:YAG/YAG	Tape casting	Planar	1.064	166	65	840	—	[90]	

续表 1

Gain medium	Fabrication technology	Waveguide configuration	Continuous-wave laser property					Beam quality M^2	Ref.
			Working wavelength / μm	Pump threshold / mW	Slope efficiency / %	Max output power / mW			
YAG/Nd:	Tape casting	Planar	1.064	160	63	840	—	[89]	
YAG/Yb:	Tape casting	Planar	1.03	900	9	288	—	[99]	
LuAG/YAG	Tape casting	Planar	2.013	—	3	173	—	[97]	
YAG/Ho:	Tape casting	Planar	2.901-2.902	—	12.7	530	—	[98]	
YAG/Ho:	Tape casting	Planar	2.901, 2.902	~2000	23.3	3920	—	[98]	
YAG/Yb:	Tape casting	Planar	1.03	—	66	3020	—	[93]	
YAG/Nd:	Tape casting	Planar	1.064	—	62.8	10400	1.16-3.22 (y axis)	[88]	
YAG/Nd:	Extrusion	End-cap type fiber	1.064	—	23	~11500	—	[101]	
Er: YAG/SF57 glass	Extrusion	Cladded fiber	2.091	<500	7	701	—	[107]	

Gain medium	Fabrication technology	Waveguide configuration	Pulse laser property						Beam quality M^2	Ref.
			Pump threshold / mW	Slope efficiency / %	Average output power / mW	Pulse energy	Pulse width	Repetition rate		
Nd:YAG ceramics	Femtosecond laser writing	Double-cladding	47	7.8	48	~14 μJ	21 ns	3.65 MHz	—	[59]
YAG/Nd:	Tape casting	Planar	110	41	265	221 nJ	179 ns	930 kHz	—	[90]
YAG/Yb:	Tape casting	Planar	—	—	385	—	2.95 ps	—	1.1×1.42	[93]
YAG/Nd:	Tape casting	Planar	—	—	—	327 mJ	250 μs	100 Hz	2.6×7.0	[87]
YAG/YAG	Tape casting	Planar	—	—	—	238 mJ	—	100 Hz	—	[86]
YAG/Nd:	Tape casting	Planar	—	—	3000	0.25	6.5 ns	10/20/30 kHz	—	[88]

4 结束语

鉴于未来固体激光器的一个重大发展方向和目标是实现高功率、高效率和高光束质量的激光输出,作为对激光产生起决定性作用的激光增益介质,其质量将直接影响器件的性能,因此是激光技术发展的核心和基础。透明陶瓷不仅具有与单晶相媲美的激光性能,而且还可以实现与玻璃相似的大尺寸制备和高浓度掺杂,再加上其特有的高温机械性能和结构可设计性,被认为是 21 世纪最有发展前途的激

光材料之一。目前,制约固体激光器发展的一个很大因素是在产生激光的同时会产生大量热量,从而出现严重的热效应,导致输出功率下降和光束质量降低,甚至给激光介质带来损伤。因此,科研人员一直在研究不同结构的激光介质以减轻热效应。其中,光波导激光陶瓷具有抽运阈值低、散热高效、结构紧凑等优点;此外,光波导激光陶瓷还有利于激光器的小型化和集成化,是一种比较理想的全固态激光器的增益介质。光波导根据对光不同维度的限制可以分为平面波导、通道波导和圆柱型波导(光纤),

通道波导又可以分为嵌入型、条型、脊型波导等。

针对不同的光波导结构,波导激光陶瓷的制备工艺得到了全面发展。离子注入技术和飞秒激光写入技术是制备通道型波导激光陶瓷的主要方法,离子注入是一种有效的制备光波导的方法,它具有可控性好、可在常温下形成光波导的特点;飞秒激光写入技术可实现三维立体微加工,所获得波导激光陶瓷折射率空间分辨率高。尽管这两种工艺均需要昂贵的设备,制备成本较高,仅限于实验室制备,但是考虑到该技术所具有的明显优势,有必要对其进行深入、持续的研究。对于圆柱型波导激光陶瓷,挤出成型结合烧结工艺使得激光陶瓷光纤的制备成为可能,但需要进一步完善其制备工艺,获得高光学质量的激光陶瓷光纤。热键合技术和流延成型结合共烧结技术是获得平面波导激光陶瓷的主要方法,热键合技术工艺简单,然而,芯层加工难度大、键合技术的界面问题和键合材料的机械强度仍旧是目前亟待解决的问题;流延成型是一种精度高、厚度可控、可连续化生产的陶瓷成型工艺,在平面波导陶瓷的制备中得到了广泛的应用。考虑到该工艺的巨大发展前景,未来的研究方向应集中于:1)在获得高光学质量样品的同时减少波导层的厚度,即抑制波导层激活离子的扩散;2)从基质材料角度对波导激光陶瓷进行优化,如采用热导率更高的倍半氧化物透明陶瓷进行波导结构制备。

参 考 文 献

- [1] Kaminskii A A. Laser crystals and ceramics: recent advances[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2010, 1(2): 93-177.
- [2] Pan Y B, Li J, Jiang B X. Advanced opto-functional transparent ceramics[M]. Beijing: Science Press, 2013.
潘裕柏, 李江, 姜本学. 先进光功能透明陶瓷[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [3] Gan Q J, Jiang B X, Zhang P D, *et al.* Research progress of high average power solid-state lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 010003.
甘啟俊, 姜本学, 张攀德, 等. 高平均功率固体激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(1): 010003.
- [4] Chen J B, Guo S F. Review on technical approaches of high energy solid-state lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(6): 0602006.
陈金宝, 郭少锋. 高能固态激光器技术路线分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0602006.
- [5] Feng H L, Liu Y S, Han F, *et al.* Progress on development of US naval shipborne laser weapons[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(2): 020004.
冯寒亮, 刘彦升, 韩锋, 等. 美国海军舰载激光武器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(2): 020004.
- [6] Ikesue A, Kinoshita T, Kamata K, *et al.* Fabrication and optical properties of high-performance polycrystalline Nd:YAG ceramics for solid-state lasers [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1995, 78(4): 1033-1040.
- [7] Heller A. Transparent ceramics spark laser advances[J]. *Science and Technology Review*, 2006(4): 9-16.
- [8] Li J, Pan Y B, Zeng Y P, *et al.* The history, development, and future prospects for laser ceramics: a review [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2013, 39: 44-52.
- [9] Sanghera J, Kim W, Villalobos G, *et al.* Ceramic laser materials[J]. *Materials*, 2012, 5(2): 258-277.
- [10] Pan Y B, Xu J, Wu Y S, *et al.* Fabrication and laser output of Nd:YAG transparent ceramic[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2006, 21(5): 1278-1280.
潘裕柏, 徐军, 吴玉松, 等. Nd:YAG透明陶瓷的制备与激光输出[J]. *无机材料学报*, 2006, 21(5): 1278-1280.
- [11] Chen J C, Li J, Xu J L, *et al.* 4350 W quasi-continuous-wave operation of a diode face-pumped ceramic Nd:YAG slab laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 63(4): 50-53.
- [12] Zhang W X, Pan Y B, Zhou J, *et al.* Diode-pumped Tm:YAG ceramic laser [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2009, 92(10): 2434-2437.
- [13] Zhang W X, Zhou J, Liu W B, *et al.* Fabrication, properties and laser performance of Ho:YAG transparent ceramic [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 506(2): 745-748.
- [14] Li J, Zhou J, Pan Y B, *et al.* Solid-state reactive sintering and optical characteristics of transparent Er:YAG laser ceramics[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2012, 95(3): 1029-1032.
- [15] Saikawa J, Sato Y, Taira T, *et al.* Absorption,

- emission spectrum properties, and efficient laser performances of $\text{Yb} : \text{Y}_3\text{ScAl}_4\text{O}_{12}$ ceramics [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(11): 1898-1900.
- [16] Nakao H, Shirakawa A, Ueda K I, *et al.* Demonstration of a Yb^{3+} -doped $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ceramic thin-disk laser [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(10): 2884-2887.
- [17] Basiev T T, Doroshenko M E, Konyushkin V A, *et al.* $\text{SrF}_2 : \text{Nd}^{3+}$ laser fluoride ceramics [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(23): 4009-4011.
- [18] Kallel T, Hassairi M A, Dammak M, *et al.* Spectra and energy levels of Yb^{3+} ions in CaF_2 , transparent ceramics [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 584: 261-268.
- [19] Bisson J F, Kouznetsov D, Ueda K I, *et al.* Switching of emissivity and photoconductivity in highly doped $\text{Yb}^{3+} : \text{Y}_2\text{O}_3$ and Lu_2O_3 ceramics [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(20): 201901.
- [20] Wang L, Huang H T, Shen D Y, *et al.* Room temperature continuous-wave laser performance of LD pumped $\text{Er} : \text{Lu}_2\text{O}_3$ and $\text{Er} : \text{Y}_2\text{O}_3$ ceramic at $2.7 \mu\text{m}$ [J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19495-19503.
- [21] Snetkov I L, Silin D E, Palashov O V, *et al.* Study of the thermo-optical constants of Yb doped Y_2O_3 , Lu_2O_3 and Sc_2O_3 ceramic materials [J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 21254-21263.
- [22] Chen W, Shi P, Hua Z W, *et al.* Semianalytical analysis of thermal effect in LD double-side-pumped rectangular laser crystal [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(18): 3751-3756.
- [23] Hostaša J, Piancastelli A, Toci G, *et al.* Transparent layered YAG ceramics with structured Yb doping produced via tape casting [J]. *Optical Materials*, 2017, 65: 21-27.
- [24] Li J, Wu Y S, Pan Y B, *et al.* Laminar-structured YAG/Nd : YAG/YAG transparent ceramics for solid-state lasers [J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2008, 5(4): 360-364.
- [25] Ikesue A, Aung Y L. Synthesis and performance of advanced ceramic lasers [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2006, 89(6): 1936-1944.
- [26] Taira T. Ceramic YAG lasers [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2007, 8(2): 138-152.
- [27] Konyushkin V A, Nakladov A N, Konyushkin D V, *et al.* Ceramic planar waveguide structures for amplifiers and lasers [J]. *Quantum Electronics*, 2013, 43(1): 60-62.
- [28] Grivas C. Optically pumped planar waveguide lasers: part II: gain media, laser systems, and applications [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2016, 45/46: 3-160.
- [29] Jelinek M. Functional planar thin film optical waveguide lasers [J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 9(2): 91-99.
- [30] Mackenzie J I. Dielectric solid-state planar waveguide lasers: a review [J]. *IEEE Journal of Selected Topic in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 626-637.
- [31] Hu Z Y, Sun W C, Wang Z Y, *et al.* Latest developments of thermally bonded planar waveguide lasers with a double-clad fabric [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, 41(2): 21-23.
胡智勇, 孙伟成, 王肇颖, 等. 热键合双包层平板波导激光器的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2004, 41(2): 21-23.
- [32] Dong M M, Lin G, Zhao Q Z. Progress on femtosecond laser-fabricated waveguide devices in transparent dielectrics [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(1): 010002.
董明明, 林耿, 赵全忠. 飞秒激光在透明介质中制备波导器件进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(1): 010002.
- [33] Tan Y, Chen F, de Aldana J R V, *et al.* Continuous wave laser generation at 1064 nm in femtosecond laser inscribed Nd : YVO₄ channel waveguides [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97(3): 031119.
- [34] Domenech M, Vázquez G V, Cantelar E, *et al.* Continuous-wave laser action at $\lambda = 1064.3 \text{ nm}$ in proton-and carbon-implanted Nd : YAG waveguides [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(20): 4110-4112.
- [35] Wang Y, Petrov V, Ding Y J, *et al.* Ultrafast generation of blue light by efficient second-harmonic generation in periodically poled bulk and waveguide potassium titanyl phosphate [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 73(7): 873-875.
- [36] Müller S, Calmano T, Metz P, *et al.* Femtosecond-laser-written diode-pumped Pr : LiYF₄ waveguide laser [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(24): 5223-5225.
- [37] Grivas C, May-Smith T C, Shepherd D P, *et al.* Laser operation of a low loss (0.1 dB/cm) Nd : Gd₃Ga₅O₁₂ thick (40 μm) planar waveguide grown

- by pulsed laser deposition [J]. Optics Communications, 2004, 229(1/6): 355-361.
- [38] Grivas C. Optically pumped planar waveguide lasers, part I: fundamentals and fabrication techniques[J]. Progress in Quantum Electronics, 2011, 35(6): 159-239.
- [39] Sato Y, Akiyama J, Taira T. Effects of rare-earth doping on thermal conductivity in $Y_3Al_5O_{12}$ crystals[J]. Optical Materials, 2009, 31(5): 720-724.
- [40] Liu J, Wang J T, Zhou T J, *et al.* Analysis and developments of high-power planar waveguide lasers [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(6): 79-85.
刘娇, 王君涛, 周唐建, 等. 高功率平面波导激光器研究进展及分析[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(6): 79-85.
- [41] Bonner C L, Bhutta T, Shepherd D P, *et al.* Double-clad structures and proximity coupling for diode-bar-pumped planar waveguide lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2000, 36(2): 236-242.
- [42] Mackenzie J I, Li C, Shepherd D P, *et al.* Longitudinally diode-pumped Nd:YAG double-clad planar waveguide laser [J]. Optics Letters, 2001, 26(10): 698-700.
- [43] Filgas D, Rockwell D, Spariosu K. Next-generation lasers for advanced active EO systems[J]. Raytheon Technology Today, 2008, 1: 9-13.
- [44] Clatterbuck T, Mordaunt D. Recent results for the Raytheon RELI program [J]. Proc Spie, 2012, 8381: 83810W.
- [45] Wang S L, Fang F Z. High power laser and its development [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 090005.
王狮凌, 房丰洲. 大功率激光器及其发展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 090005.
- [46] Li Y, Miller K, Johnson E G, *et al.* Lasing characteristics of Ho:YAG single crystal fiber[J]. Optics Express, 2016, 24(9): 9751-9756.
- [47] Harrington J A. Single-crystal fiber optics: a review [J]. SPIE, 2014, 8959: 79-86.
- [48] Chen F, Ma L, Akhmadaliev S, *et al.* Ion irradiated Er:YAG ceramic cladding waveguide amplifier in C and L bands [J]. Optical Materials Express, 2016, 6(3): 711-716.
- [49] Salamu G, Jipa F, Zamfirescu M, *et al.* Laser emission from diode-pumped Nd:YAG ceramic waveguide lasers realized by direct femtosecond-laser writing technique [J]. Optics Express, 2014, 22(5): 5177-5182.
- [50] Ródenas A, Zhou G, Jaque D, *et al.* Direct laser writing of three-dimensional photonic structures in Nd:yttrium aluminum garnet laser ceramics [J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(15): 151104.
- [51] Torchia G A, Meilán P F, Rodenas A, *et al.* Femtosecond laser written surface waveguides fabricated in Nd:YAG ceramics [J]. Optics Express, 2007, 15(20): 13266-13271.
- [52] Torchia G A, Rodenas A, Benayas A, *et al.* Highly efficient laser action in femtosecond-written Nd:yttrium aluminum garnet ceramic waveguides [J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(11): 111103.
- [53] Rodenas A, Benayas A, Macdonald J R, *et al.* Direct laser writing of near-IR step-index buried channel waveguides in rare earth doped YAG [J]. Optics Letters, 2011, 36(17): 3395-3397.
- [54] Calmano T, Siebenmorgen J, Paschke A G, *et al.* Femtosecond-laser written highly doped Yb(15%):YAG ceramic waveguide laser [C]. Advances in Optical Materials, 2011: AIThF2.
- [55] Ren Y, Brown G, Ródenas A, *et al.* Mid-infrared waveguide lasers in rare-earth-doped YAG [J]. Optics Letters, 2012, 37(16): 3339-3341.
- [56] Castillo-Vega G R, Penilla E H, Camacho-López S, *et al.* Waveguide-like structures written in transparent polycrystalline ceramics with an ultra-low fluence femtosecond laser [J]. Optical Materials Express, 2012, 2(10): 1416-1424.
- [57] Jia Y C, Aldana J R V, Chen F. Efficient waveguide lasers in femtosecond laser inscribed double-cladding waveguides of Yb:YAG ceramics [J]. Optical Materials Express, 2013, 3(5): 645-650.
- [58] Jia Y C, de Aldana J R V, Akhmadaliev S, *et al.* Femtosecond laser micromachined ridge waveguide lasers in Nd:YAG ceramics [J]. Optical Materials, 2013, 36(2): 228-231.
- [59] Tan Y, Luan Q F, Liu F Q, *et al.* Q-switched pulse laser generation from double-cladding Nd:YAG ceramics waveguides [J]. Optics Express, 2013, 21(16): 18963-18968.
- [60] Li J, Ge L, Zhou Z W, *et al.* Development of solid-state waveguide laser materials [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015, 43(1): 48-59.
李江, 葛琳, 周智为, 等. 全固态波导激光材料的研究

- 究进展[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(1): 48-59.
- [61] Chen F. Micro-and submicrometric waveguiding structures in optical crystals produced by ion beams for photonic applications [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(5): 622-640.
- [62] Tan Y, Zhang C, Chen F, *et al.* Room-temperature continuous wave laser oscillations in Nd : YAG ceramic waveguides produced by carbon ion implantation[J]. *Applied Physics B*, 2011, 103(4): 837-840.
- [63] Tan Y, Luan Q F, Liu F Q, *et al.* Swift carbon ion irradiated Nd : YAG ceramic optical waveguide amplifier [J]. *Optics Express*, 2013, 21 (12): 13992-13997.
- [64] Tan Y, Akhmadaliev S, Zhou S Q, *et al.* Guided continuous-wave and graphene-based Q-switched lasers in carbon ion irradiated Nd : YAG ceramic channel waveguide [J]. *Optics Express*, 2014, 22 (3): 3572-3577.
- [65] Yao Y C, Zhang C, Vanga S K, *et al.* Proton or helium ion beam written channel waveguides in Nd: YAG ceramics [J]. *Optical Materials*, 2013, 35 (12): 2257-2260.
- [66] Zhang Y. Femtosecond pulsed laser lithography waveguide technology [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2009.
张雁. 飞秒脉冲激光光刻波导技术[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.
- [67] Della Valle G, Osellame R, Laporta P. Micromachining of photonic devices by femtosecond laser pulses [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2008, 11(1): 13001-13018.
- [68] Chen F, Aldana J R. Optical waveguides in crystalline dielectric materials produced by femtosecond-laser micromachining [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(2): 251-275.
- [69] Liu H L, Jia Y C, de Aldana J R V, *et al.* Femtosecond laser inscribed cladding waveguides in Nd : YAG ceramics: fabrication, fluorescence imaging and laser performance[J]. *Optics Express*, 2012, 20(17): 18620-18629.
- [70] Calmano T, Paschke A G, Siebenmorgen J, *et al.* Characterization of an Yb:YAG ceramic waveguide laser, fabricated by the direct femtosecond-laser writing technique[J]. *Applied Physics B: Lasers & Optics*, 2011, 103(1): 1-4.
- [71] Salamu G, Jipa F, Zamfirescu M, *et al.* Cladding waveguides realized in Nd:YAG ceramic by direct femtosecond-laser writing with a helical movement technique[J]. *Optical Materials Express*, 2014, 4 (4): 790-797.
- [72] Salamu G, Jipa F, Zamfirescu M, *et al.* Watt-level output power operation from diode-laser pumped circular buried depressed-cladding waveguides inscribed in Nd : YAG by direct femtosecond-laser writing[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(1): 1-9.
- [73] Ter-Gabrielyan N, Fromzel V, Mu X, *et al.* High efficiency, resonantly diode pumped, double-clad, Er : YAG-core, waveguide laser [J]. *Optics Express*, 2012, 20(23): 25554-25561.
- [74] Ng S P, Mackenzie J I. Power and radiance scaling of a 946 nm Nd:YAG planar waveguide laser [J]. *Laser Physics*, 2012, 22(3): 494-498.
- [75] Howatt G N, Breckenridge R G, Brownlow J M. Fabrication of thin ceramic sheets for capacitors[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2006, 30 (8): 237-242.
- [76] Yang K W, Ba X W, Li J, *et al.* Multilayer YAG/Yb:YAG composite ceramic laser[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 21(1): 168-172.
- [77] Wang C, Li W X, Bai D B, *et al.* Mode-locked composite YAG/Yb:YAG ceramic laser and high-power amplification [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(4): 433-436.
- [78] Tang F, Cao Y G, Huang J Q, *et al.* Multilayer YAG/Re:YAG/YAG laser ceramic prepared by tape casting and vacuum sintering method[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2012, 32(16): 3995-4002.
- [79] Ba X W. Transparent laser ceramics with multilayers composite structures[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
巴学巍. 多层复合激光透明陶瓷[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [80] Tang F, Cao Y G, Huang J Q, *et al.* Fabrication and laser behavior of composite Yb:YAG ceramic [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2012, 95(1): 56-69.
- [81] Ma C Y, Tang F, Zhu J F, *et al.* Cation diffusion at the interface of composite YAG/Re:LuAG (Re=Nd or Yb) transparent ceramics [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2016, 36 (10): 2555-2564.
- [82] Tang F, Cao Y G, Huang J Q, *et al.* Diode-

- pumped multilayer Yb : YAG composite ceramic laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 9(8): 564-569.
- [83] Ge L. Fabrication, microstructure and properties of the planar waveguide and the gradient doping laser ceramics [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
葛琳. 平面波导与梯度掺杂型激光陶瓷的制备、结构与性能研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [84] Ge L, Li J, Zhou Z W, *et al.* Fabrication of composite YAG/Nd : YAG/YAG transparent ceramics for planar waveguide laser [J]. *Optical Materials Express*, 2014, 4(5): 1042-1049.
- [85] Ge L, Li J, Qu H Y, *et al.* Sintering behavior, doping profile and planar waveguide laser performance of the tape casting YAG/Nd : YAG/YAG ceramics [J]. *Optical Materials*, 2016, 60: 221-229.
- [86] Liu J, Ge L, Feng L W, *et al.* Diode-pumped composite ceramic Nd : YAG planar waveguide amplifier with 327 mJ output at 100 Hz repetition rate[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(5): 61-65.
- [87] Rao H, Liu Z J, Cong Z H, *et al.* High power YAG/Nd : YAG/YAG ceramic planar waveguide laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14 (4): 045801.
- [88] Ma C Y, Tang F, Lin H F, *et al.* Fabrication and planar waveguide laser behavior of YAG/Nd : YAG/YAG composite ceramics by tape casting [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 640: 317-320.
- [89] Lin H F, Tang F, Chen W D, *et al.* Diode-pumped tape casting planar waveguide YAG/Nd : YAG/YAG ceramic laser [J]. *Optics Express*, 2015, 23 (6): 8104-8112.
- [90] Wu Y S, Li J, Pan Y B, *et al.* Diode-pumped Yb : YAG ceramic laser [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2010, 90(10): 3334-3337.
- [91] Zhao Y, Liu Q, Ge L, *et al.* Tape casting fabrication and properties of planar waveguide YAG/Yb : YAG/YAG transparent ceramics [J]. *Optical Materials*, 2017, 69: 169-174.
- [92] Wang C, Li W X, Yang C, *et al.* Ceramic planar waveguide laser of non-aqueous tape casting fabricated YAG/Yb : YAG/YAG [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 31289.
- [93] Liu Q, Zhao Y, Ge L, *et al.* Fabrication and ion diffusion behavior of planar waveguide YAG/Yb : YAG/YAG transparent ceramics [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 45(6): 749-755.
刘强, 赵玉, 葛琳, 等. 平面波导 YAG/Yb : YAG/YAG 透明陶瓷的制备与离子扩散行为 [J]. *硅酸盐学报*, 2017, 45(6): 749-755.
- [94] Lin S, Wu W L, Zhan Z L, *et al.* Evaluation of bonding interface on different types of dentin after Er : YAG laser irradiation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(3): 0304001.
林实, 吴为良, 詹振林, 等. Er : YAG 激光辐射后不同牙本质粘结界面的微观形态观察 [J]. *中国激光*, 2011, 38(3): 0304001.
- [95] Zhu J, Shi H M, Zhang M Y, *et al.* The clinical application of Ho : YAG laser in various department [J]. *Applied Laser*, 2003, 23(2): 109-116.
朱菁, 施虹敏, 张美珏, 等. Ho : YAG 激光在临床各科的应用 [J]. *应用激光*, 2003, 23(2): 109-116.
- [96] Yao B Q, Li X L, Dai T Y, *et al.* Diode-pumped tape casting planar waveguide YAG/Tm : YAG/YAG ceramic laser at 2013. 76 nm [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(2): 254-256.
- [97] Wu J, Ju L, Yao B Q, *et al.* Tunable single-longitudinal-mode operation of a sandwich-type YAG/Ho : YAG/YAG ceramic laser [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 78: 40-44.
- [98] Ma C Y, Zhu J F, Liu K, *et al.* Longitudinally diode-pumped planar waveguide YAG/Yb : LuAG/YAG ceramic laser at 1030. 7 nm [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(14): 3317-3319.
- [99] Ikesue A, Aung Y L, Okamoto T, *et al.* Development of free designable ceramic fiber lasers [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2006: CTuEE3.
- [100] Ikesue A, Aung Y L. Progress in ceramic Nd : YAG laser [J]. *SPIE*, 2007, 6552: 655209.
- [101] Kim H J, Fair G, Lee H D, *et al.* Processing and transparency of polycrystalline yttrium aluminum garnet (YAG) fibers for optical applications [C]. *SPIE*, 2011, 7912: 79121T.
- [102] Kim H J, Fair G E, Hart A M, *et al.* Development of polycrystalline yttrium aluminum garnet (YAG) fibers [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2015, 35(15): 4251-4258.
- [103] Fair G E, Hay R, Lee H D, *et al.* Towards optical quality yttrium aluminum garnet (YAG) fibers: recent efforts at AFRL/RX [C]. *SPIE*, 2010, 7686: 76860E.

- [104] Fair G E, Kim H J, Lee H D, *et al.* Development of ceramic fibers for high-energy laser applications [C]. SPIE, 2011, 8039: 80390X.
- [105] Kim H J, Fair G E, Hart A M, *et al.* Influence of processing variables on the properties of polycrystalline YAG fibers[C]. SPIE, 2012, 8381: 838111.
- [106] Kim H, Hay R, McDaniel S A, *et al.* Lasing of surface-polished polycrystalline Ho:YAG (yttrium aluminum garnet) fiber[J]. Optics Express, 2017, 25(6): 6725-6731.