

文章编号: 1001-3806(2004)05-0498-05

## 布里渊光纤环形激光器及其应用

董永康, 吕志伟, 吕月兰, 何伟明  
(哈尔滨工业大学 光电子技术研究所, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 综述了布里渊光纤环形激光器的研究进展, 指出布里渊光纤环形激光器具有线宽窄、频率稳定、增益方向敏感等优点。介绍了布里渊光纤环形激光器在布里渊光纤陀螺中的应用及其发展前景。

**关键词:** 受激布里渊散射; 光纤; 布里渊光纤环形激光器; 布里渊光纤陀螺

**中图分类号:** O437.2 **文献标识码:** A

### Brillouin fiber-optic ring laser and its applications

DONG Yong-kang, LI Zhi-wei, LI Yue-lan, HE Wei-ming

(Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The present research situation of Brillouin fiber-optic ring lasers is introduced. The Brillouin fiber-optic lasers have advantages of narrow line width, stable frequency, directional sensitivity of the SBS gain, etc. Brillouin fiber-optic gyroscope as the principal application is discussed in detail.

**Key words:** stimulated Brillouin scattering; optical fiber; Brillouin fiber-optic ring laser; Brillouin fiber-optic gyroscope

### 引 言

把光纤置于谐振腔内, 利用光纤中的布里渊增益就构成布里渊光纤激光器。早在 1976 年, 这种激光器就由 HILL<sup>[1]</sup> 制造出来, 但当时使用的光纤损耗很高 (约 100dB/km), 谐振腔内 1 圈的损耗为 70%, 抽运阈值约为 100mW, 故使用大功率 Ar<sup>3+</sup> 激光器作为抽运光。随着低损耗单模光纤的出现, 使用光纤耦合器做成的布里渊光纤环形激光器的抽运阈值仅为几十个微瓦<sup>[2]</sup>, 因此, 低功率的单频 He-Ne 激光器、半导体激光器等都可以作为其抽运源。布里渊光纤环形激光器具有线宽窄、频率稳定、增益方向敏感等优点, 因此一直是人们研究的热点<sup>[3~10]</sup>。近年来, 人们广泛研究了布里渊光纤环形激光器在以下方面的应用: 分布式温度、压力传感器<sup>[11, 12]</sup>; 窄带放大器<sup>[13]</sup>; 微波频率产生器<sup>[14]</sup>; 移频器<sup>[15]</sup>。但是, 人们最大的兴趣可能在于布里渊光纤环形激光器在布里渊光纤陀螺中的应用<sup>[16~20]</sup>。

布里渊光纤环形激光器具有极窄的线宽, 实验上已测得的线宽要小于 30Hz, 而理论上

作者简介: 董永康 (1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事非线性光学研究。

E-mail: aldendong@hit.edu.cn

收稿日期: 2003-11-07; 收到修改稿日期: 2003-12-18

SCHAWLOW 等人<sup>[21]</sup>的研究表明, 线宽 300kHz、输出 100 $\mu$ W 的激光线宽极限为 10<sup>-3</sup>Hz。因为有如此窄的线宽, SBS 激光具有极高的相干性。适当选择光纤谐振腔的结构, SBS 激光可以稳定地以单纵模运转并且保持线宽稳定。利用布里渊增益的方向性, 可以使两束 SBS 激光在同一谐振腔内运转, 这为布里渊光纤陀螺的应用提供了可能。

### 1 布里渊光纤环形激光器研究进展

布里渊光纤激光器有环形腔和 F-P 腔两种结构。环形腔不需要腔镜, 可以用光纤定向耦合器构成。与环形腔结构的布里渊光纤激光器相比, F-P 腔结构的布里渊光纤激光器容易通过级联 SBS 产生高阶 Stokes 线。因此, 为了避免通过级联 SBS 产生多条 Stokes 线, 大多数布里渊光纤激光器采用环形腔结构。

图 1 是 SMITH 等人<sup>[3]</sup>使用的常规布里渊光纤环形激光器示意图。抽运光 (标记为 P) 以逆时针



图 1 常规布里渊光纤环形激光器示意图

方向耦合进单模光纤谐振腔。为了使抽运光在腔内具有最大的传输效率,抽运光由一个偏振器控制偏振方向使之与谐振腔的本征偏振态相匹配。抽运光的频率被一个反馈环控制在光纤谐振腔的谐振中心频率处。SBS 激光(标记为  $B$ )在光纤谐振腔内沿顺时针方向传输,通过一个方向耦合器从输出臂中耦合出来。

由于 SBS 增益具有方向性,即只有后向受激散射光,这使得方向相反的两束抽运光产生的 SBS 激光可以在同一谐振腔内运转,这就是同腔布里渊光纤环形激光器。图 2 是 SMITH 等人<sup>[3]</sup>使用的同腔布里渊光纤环形激光器示意图。两个独立的抽运光(标记为  $P_1, P_2$ )以相反的方向耦合进同一个光纤谐振腔,并被锁定在不同的纵模上(两纵模间隔为 92MHz)。相应的 SBS 激光(标记为  $B_1, B_2$ )通过方向耦合器同时输出,它们的拍频通过一个光电二极管探测并由频谱仪分析拍频的频谱。实验观测到中心频率为 92MHz、宽度为 30Hz 的拍频,它近似等于光谱分析仪的分辨率,这意味着 SBS 激光的线宽要小于 30Hz。实验测得相应抽运光的拍频线宽为 120kHz,因此,SBS 激光线宽要比抽运光线宽小 4 个量级。

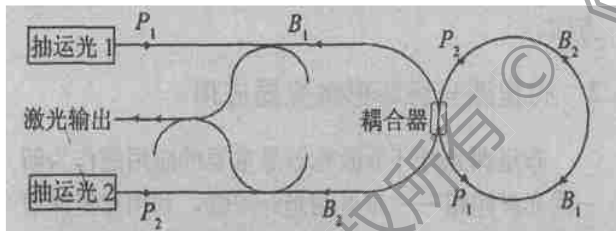


图 2 同腔布里渊光纤环形激光器示意图

YONG 等人<sup>[4]</sup>提出一种使用非平衡马赫-曾德尔干涉仪(UMZI)作为耦合器的新型布里渊光纤环形激光器。这种结构充分利用 UMZI 对频率有不同响应的特点,可以使抽运光在光纤谐振腔内只传输一次,而 Stokes 波可以在光纤谐振腔内多次循环形成振荡。图 3 是 UMZI 光纤谐振腔的结构。端口 B

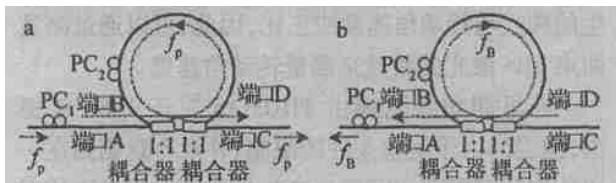


图 3 UMZI 光纤谐振腔

a—抽运光通过一次 b—SBS 光作多次循环

和 D 由单模光纤连接构成谐振腔。抽运光以逆时针方向在光纤谐振腔内传输,产生的 Stokes 波有一个布里渊频移  $\Delta f_{BS}$ 。假设抽运光频率  $f_p$  与从端口

A 到端口 D 透射率最大频率相匹配,如图 3a 所示,则抽运光先从 A 传输到 D,通过谐振腔,然后可以由端口 B 传输到端口 C,这使得抽运光在谐振腔内只传输一次。同时控制 UMZI 两臂的长度,使得频率间隔  $\Delta f_{MZ}$  与布里渊频移  $\Delta f_{BS}$  相等。因此,Stokes 波具有从端口 D 到端口 B 最大透射率频率  $f_B$ ,这样 Stokes 波就可以以很小的损耗在环形腔内多次循环形成振荡,见图 3b。但在使用以上提出的实际谐振腔系统中,腔内的光纤和 UMZI 中的光纤都具有双折射特性,因此透射率与入射光的偏振态有关,这就有必要使用偏振控制器来控制入射光的偏振态(如图 3 所示)。这可通过如下措施来实现:(1)使用偏振控制器  $PC_1$  来调节入射光偏振态,以使抽运光从 A 到 D 有最大透射率;(2)设置  $PC_2$ ,使进入端口 B 的光与进入 A 的光具有相同的偏振态;(3)抽运光的频率应被调谐到从 A 到 D 的最大透射率处。UMZI 布里渊光纤环形激光器的优点是可以使用一般布里渊光纤环形激光器不能使用的 DFB(分布反馈式)半导体激光器,由于 DFB 半导体激光器的线宽较宽会导致一般布里渊光纤环形激光器输出不稳定。

图 4 是 COWLE 等人<sup>[5]</sup>使用的掺铒放大布里渊光纤环形激光器示意图。掺铒放大布里渊光纤环形

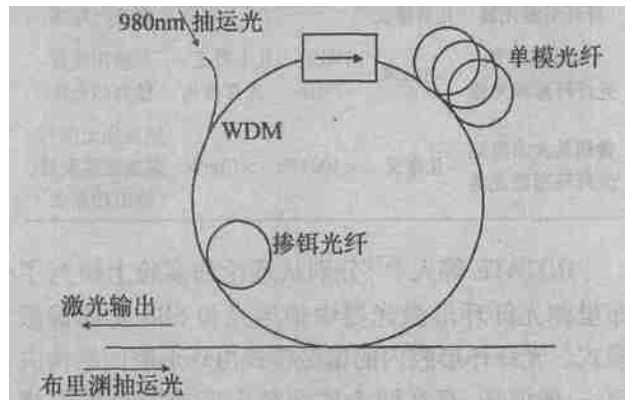


图 4 掺铒放大布里渊光纤环形激光器示意图

激光器使用两种增益介质,单模光纤中的非线性布里渊增益和掺铒光纤中的线性增益。使用掺铒光纤放大器补偿谐振腔的损耗,而激光仍是由布里渊增益产生的。激光器是由一段掺铒光纤、一段单模光纤和一个光隔离器组成。980nm 的半导体激光器通过一个波分复用耦合器抽运掺铒光纤。尽管没有布里渊抽运注入,掺铒放大布里渊光纤环形激光器也会产生激光,但与有布里渊抽运注入时模式完全不同。当一个窄带布里渊抽运注入到单模光纤中,在顺时针方向产生一个很窄的布里渊增益。此时,

由于谐振腔的损耗不能产生 SBS 激光。掺铒光纤的 980nm 抽运光注入后也产生增益,可以补偿谐振腔的损耗。当布里渊抽运光频率接近掺铒光纤增益曲线最大值所对应的频率时,就会产生具有 Stokes 频移的 SBS 激光。假设宽带掺铒光纤增益的最大值在波长  $a$  点,窄带布里渊增益在波长  $b$  点。如果  $b$  点的总增益大于  $a$  点的掺铒光纤增益,并且大于谐振腔阈值,就会产生 SBS 激光;如果  $b$  点离  $a$  点较远,使得  $b$  点的总增益小于  $a$  点的掺铒光纤增益,则产生的激光完全是由掺铒光纤产生的。光隔离器的作用是阻止布里渊抽运光进入掺铒光纤。一般布里渊光纤环形激光器都采用低损耗光纤谐振腔,抽运光的模式要与谐振腔相匹配,而且输出激光功率较小;而掺铒放大布里渊光纤环形激光器可以使用高损耗谐振腔,抽运光的模式无需与谐振腔相匹配,而且输出功率较大。在文献[5]中,当 980nm 抽运光为 50mW,布里渊抽运光为 5.7mW 时,输出的 SBS 激光功率可达 10mW。各种布里渊光纤环形激光器性能参数比较见表 1。

表 1 各种布里渊光纤环形激光器性能参数比较

类别	抽运阈值	抽运线宽	输出功率	优点
常规布里渊光纤环形激光器	几十微瓦~几百微瓦	< 100kHz	几十微瓦	结构简单
同腔布里渊光纤环形激光器	几十微瓦~几百微瓦	< 100kHz	几十微瓦	应用于布里渊光纤陀螺
UMZI 布里渊光纤环形激光器	> 10mW	1MHz~2MHz	几十微瓦~几百微瓦	可使用线宽较宽的光源
掺铒放大布里渊光纤环形激光器	几毫瓦	< 100kHz	> 10mW	抽运光无须与谐振腔匹配且输出功率大

HOTATE 等人<sup>[6,7]</sup>分别从理论和实验上研究了布里渊光纤环形激光器中抽运光和 SBS 光的偏振模式。光纤环形腔内的偏振模式由环形腔的结构决定,一般说来,存在两个本征偏振态或两个偏振横模。普遍的问题是由于两个偏振横模产生交叉位相调制,导致激光振荡和输出不稳定。实验中使用保偏光纤构成光纤谐振腔。首先从光纤谐振腔的中点截断,然后把两根光纤相对旋转 90°后再焊接上。因此,在交接处两边光纤的偏振轴相互垂直。经过这样处理后,相邻两偏振横模相互正交并且保持频率间隔稳定。处在布里渊增益中心处的偏振横模产生振荡并且有稳定的激光输出。同时实验结果显示,由于温度变化引起布里渊增益中心移动而导致激光输出跳模,但两相邻的模式之间偏振态仍是相

互正交的。

稳定的单频输出对于布里渊光纤环形激光器的应用有很重要意义。NICATI 等人<sup>[8,9]</sup>研究了温度、光克尔效应、非线性相移对单频输出稳定性的影响。温度的变化会引起激光输出频率变化和跳模现象。温度变化会使腔长变化,因而使光纤谐振腔自由光谱范围发生变化,这会使激光输出频率连续变化。而由温度变化引起的布里渊增益中心频率的移动会使激光输出产生跳模现象。实验中测得温度变化 5℃时,激光输出就会产生跳模,由此而测出布里渊频移的热系数与以前的报道相吻合。光克尔效应和非线性相移都会引起频率牵引,但实验中发现当抽运光功率为光纤谐振腔抽运阈值 4 倍时,光克尔效应和非线性相移引起的频率牵引相互抵消。

BA YVEL 等人<sup>[10]</sup>在理论上讨论了在抽运抽空情况下光纤谐振腔中受激布里渊散射产生的阈值、Stokes 波输出功率和转换效率。在低损耗、高精度的光纤谐振腔中 SBS 阈值只有几十微瓦。Stokes 波输出功率随光纤谐振腔的腔长变化不大,这是因为虽然腔长增加可以降低阈值,但同时也降低了光纤谐振腔的精细度。转换效率先随抽运光能量的增加而增加,最后趋于饱和。

目前,就布里渊光纤环形激光器的应用而言,控制单频 SBS 激光产生及稳定输出仍是人们研究的方向。

## 2 布里渊光纤环形激光器应用

布里渊光纤环形激光器最重要的应用是作为新一代光纤陀螺——布里渊光纤陀螺。利用布里渊增益的方向性,可以使两束 SBS 激光在同一谐振腔内运转,布里渊光纤陀螺就是采用这种同腔布里渊光纤环形激光器。布里渊光纤陀螺与干涉型光纤陀螺原理有很大不同:干涉型陀螺把光纤环作为干涉仪,通过测量干涉条纹来测量转动角速度;而布里渊光纤陀螺把光纤环作为谐振腔。根据 Sagnac 效应,在同一个光纤环内传播方向相反的两束 SBS 激光产生的频差与转动角速度成正比,因此,可以通过测量两束 SBS 激光的频差来测量转动角速度。

布里渊光纤陀螺由 THOMAS<sup>[16]</sup>于 1980 年提出,但当时由于实验条件的限制,并没有观测到在一定角速度下两束 SBS 激光产生的拍频。第 1 次从实验上演示布里渊光纤陀螺的是 ZARINETCH<sup>[17]</sup>在 1991 年做的实验。图 5 是他提出的基于受激布里渊散射固态环形光纤陀螺示意图。输出功率为

2mW、波长  $1.15\mu\text{m}$  的单纵模 He-Ne 激光作为抽运光,抽运光被分束片分成两束  $P_1$  和  $P_2$ 。使用声光

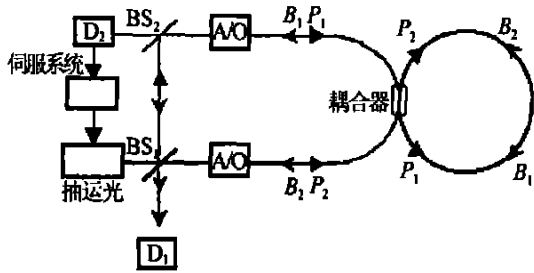


图 5 固态环形布里渊光纤陀螺示意图

调制器使  $P_1$ ,  $P_2$  以不同的纵模频率(相差 12 个纵模间隔, 92.4MHz)沿相反的方向在光纤谐振腔内传输。光纤谐振腔由单模光纤构成,自由光谱范围为 7.7MHz。由抽运光  $P_1$ ,  $P_2$  产生的 SBS 激光  $B_1$ ,  $B_2$  通过分束片  $BS_1$  同时输出。为了使抽运光在光纤谐振腔内有最大的传输效率,调节抽运光偏振态使之与光纤谐振腔的本征偏振态相匹配,另外,通过反馈伺服系统调节抽运光频率使之处在谐振腔谐振中心频率处。实验观测到,当角速度以正弦函数变化时,产生的拍频是中心频率为 92.4MHz 的正弦函数。

布里渊光纤陀螺存在的主要问题有:(1)当旋转角速度小时没有拍频产生,即锁定现象;(2)判断角速度方向;(3)单频 SBS 激光产生及稳定输出。对锁定问题目前没有完全解决方案,但也提出了一些减小这种效应的办法,如利用推拉式相位调制<sup>[18]</sup>、光克尔效应<sup>[19]</sup>、使用保偏光纤<sup>[20]</sup>等来降低产生锁定时的角速度。判断角速度方向有 3 种办法:一是采用偏频的办法<sup>[17]</sup>,使用声光调制器使一束抽运光相对于另一束抽运光偏移一定频率,但声光移频器的稳定性将直接影响测量精度;二是采用推拉式相位调制<sup>[18]</sup>,但是对激光进行推拉式相位调制会引起振荡器的不稳定;三是采用位相差异产生两个拍频信号<sup>[20]</sup>,通过检测两个拍频信号的位相差来判断方向,这种方法不会产生振荡器不稳定。控制布里渊光纤陀螺单频 SBS 激光产生及稳定输出的方法与布里渊光纤环形激光器相同。

布里渊光纤陀螺误差产生的原因有双折射效应、光克尔效应和环境温度变化等,其中温度变化又是重要因素。因此,控制温度稳定对提高测量精度有很大意义。而自由漂移极限是由 SBS 激光线宽决定的,实验中已测得的线宽小于 30Hz(光谱仪极限)。DEBUT 等人<sup>[22,23]</sup>从理论上分析了布里渊光纤环形激光器的线宽压缩机制。认为抽运光在转化

为 Stokes 光时,其相位噪声由于声子衰减和谐振腔反馈作用被大大减弱,因此 SBS 激光线宽得到压缩。一般对于使用高精度光纤谐振腔的布里渊光纤环形激光器,SBS 激光线宽可压缩 4 个量级。

目前,布里渊光纤陀螺作为一种新概念光纤陀螺,人们对其已经进行了广泛的基础研究。与干涉型光纤陀螺相比,布里渊光纤陀螺不需要复杂的信号检测和信号处理系统,输出的拍频信号可以直接处理,而且光纤谐振腔使用的光纤较短,因此结构简单,耐久性大为提高,具有更大的实用意义。

此外,布里渊光纤环形激光器还可以用于稳定自由运转激光器频率和线宽。选取光纤谐振腔的自由光谱范围大于布里渊增益,使腔内只有一个模式产生振荡,就会输出稳定的单纵模;使谐振腔的自由光谱范围大于抽运光的漂移就可以使输出激光线宽稳定。利用布里渊光纤环形激光器产生的 SBS 激光与抽运光产生的拍频(典型值为 10GHz)驱动,可以制成微波频率产生器。布里渊光纤环形激光器还可应用于分布式压力、温度传感器,窄带放大器,移频器等。

### 3 结束语

布里渊光纤环形激光器因具有线宽窄、频率稳定、增益方向敏感等优点而得到广泛的研究。布里渊光纤陀螺作为布里渊光纤环形激光器的主要应用也已引起人们的极大兴趣,成为新一代高精度、小型化光纤陀螺的发展方向。

### 参 考 文 献

- [1] HILL K O, KAWASAKI B S, JOHNSON D C. CW Brillouin laser [J]. A P L, 1976, 28(10): 608~609.
- [2] STOKES L F, CHODOROW M, SHAW H J. All-fiber stimulated Brillouin ring laser with submilliwatt pump threshold [J]. Opt Lett, 1982, 7(10): 509~511.
- [3] SMITH S P, ZARINETCHI F, EZEKIEL S. Narrow-linewidth stimulated Brillouin fiber laser and applications [J]. Opt Lett, 1991, 16(6): 393~395.
- [4] YONG J C, THEVENAZ L, KIM B Y. Brillouin fiber laser pumped by a DFB laser diode [J]. J Lightwave Technol, 2003, 21(21): 546~554.
- [5] COWLE J, STEPANOV Y, CHIENG T. Brillouin/erbium fiber lasers [J]. J Lightwave Technol, 1997, 15(7): 1198~1204.
- [6] HOTATE K, TANAKA Y. Analysis on state of polarization of stimulated Brillouin scattering in an optical fiber ring-resonator [J]. J Lightwave Technol, 1995, 13(3): 384~390.
- [7] TANAKA Y, HOTATE K. Fiber Brillouin ring laser without instability due to interaction between the polarization lateral modes [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1995, 7(5): 482~484.
- [8] NICATI P A, TOYAMA K, HUANG S *et al.* Temperature ef-

- fects in a Brillouin fiber ring laser [J]. *Opt Lett*, 1993, 18(24): 2123~2125.
- [9] NICATI P A, TOYAMA K, SHAW H J. Frequency stability of a Brillouin fiber ring laser [J]. *J Lightwave Technol*, 1995, 13(7): 1445~1451.
- [10] BAYVEL P, GILES I P. Evaluation of performance parameters of single-mode all-fiber Brillouin ring lasers [J]. *Opt Lett*, 1989, 14(11): 581~583.
- [11] TATEDA M, HORIGUCHI Y, KURASHIMA T *et al.* First measurement of strain distribution along field-installed optical fibers using Brillouin spectroscopy [J]. *J Lightwave Technol*, 1990, 8(9): 1266~1276.
- [12] KURASHIMA T, HORIGUCHI T, TATEDA M. Distributed temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers [J]. *Opt Lett*, 1990, 15(13): 1038~1040.
- [13] FERREIRA M F, ROCHA J F, PINTO J L. Analysis of the gain and noise characteristics of fiber Brillouin amplifiers [J]. *Opt Quantum Electron*, 1994, 26(1): 34~44.
- [14] CULVERHOUSE D, KALLI K, JACKON D A. Stimulated Brillouin scattering ring resonator laser for SBS gain studies and microwave generation [J]. *Electron Lett*, 1991, 27(24): 2033~2035.
- [15] KALLI K, CULVERHOUSE D, JACKON D A. Fiber frequency shifter based on generation of stimulated Brillouin scattering in high-finesse ring resonator [J]. *Opt Lett*, 1991, 16(19): 1538~1540.
- [16] THOMAS P J, van DRIEL H M, STEGEMAN G I A. Possibility of using an optical fiber Brillouin ring laser for inertial sensing [J]. *Appl Opt*, 1980, 19(12): 1906~1908.
- [17] ZARINETCHI F, SMITH S P, EZEKIEL S. Stimulated Brillouin fiber-optic laser gyroscope [J]. *Opt Lett*, 1991, 16(4): 229~231.
- [18] HUANG S, NICATI P A, TOYAMA K. Synthetic heterodyne detection in a fiber-optic ring-laser gyro [J]. *Opt Lett*, 1993, 18(1): 81~83.
- [19] TAKIGUCHI K, HOTATE K. Removal of lock-in phenomenon in optical passive ring-resonator gyro by using optical Kerr-effect in fiber ring resonator [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1992, 4(7): 810~812.
- [20] TANAKA Y, YAMASAKI S, HOTATE K *et al.* Brillouin fiber-optic gyro with directional sensitivity [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1996, 8(10): 1367~1369.
- [21] SCHWLOW A L, TOWNES C H. Infrared and optical masers [J]. *Phys Rev*, 1958, 112: 1940~1949.
- [22] DEBUT A, RANDOUX S, ZEMMOURI J. Linewidth narrowing in Brillouin lasers: theoretical analysis [J]. *Phys Rev*, 2000, A62(2): 023803-1~023803-4.
- [23] DEBUT A, RANDOUX S, ZEMMOURI J. Experimental and theoretical study of linewidth narrowing in Brillouin fiber ring lasers [J]. *J O S A*, 2001, B18(4): 556~567.

(上接第 490 页)

的单晶尺寸为 23cm 长,但是制得的多晶陶瓷的长度已达到单晶的 2 倍;(4)多功能性。陶瓷的制造能够和调  $Q$  以及喇曼相结合,但是单晶就不可能做到这一点;(5)大批量生产。陶瓷激光棒适合流水线作业,减少了时间和费用,但是单晶却不然。

正是由于多晶 Nd:YAG 陶瓷弥补了单晶 Nd:YAG 的很多不足,因此, Nd:YAG 多晶透明陶瓷作为激光增益介质具有极大的潜力。

感谢上海光机所光子晶体实验室宋秀东老师在吸收光谱测量上给予的帮助,感谢玻璃室李顺光在荧光光谱和荧光寿命测试方面给予的帮助。

#### 参 考 文 献

- [1] LU J, MURAI T, TAKAICHI K *et al.* Nd<sup>3+</sup>:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic laser [J]. *Japan J A P*, 2001, 40:L1277~L1279.
- [2] LU J, TAKAICHI K, UEMATSU T *et al.* Promising ceramic laser material: highly transparent Nd<sup>3+</sup>:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic [J]. *A P L*, 2002, 23: 4324~4326.
- [3] LU J, TAKAICHI K, UEMATSU T *et al.* Yb<sup>3+</sup>:Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics-a novel solid-state laser material [J]. *Japan J A P*, 2002, 41: L1373~L1375.
- [4] de WITH G, van DIJ KHJ A. Translucent Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> ceramics [J]. *Mat Res Bull*, 1984, 19: 1669~1674.
- [5] SEKITA M, HANEDA H, YANAGITANI T *et al.* Induced emission cross section of Nd:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> ceramics [J]. *J A P*, 1990, 67(1): 453~458.
- [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]. *J Amer Ceram Soc*, 1995, 78(4): 1033~1040.
- [7] YANAGITANI T, YAGI H, ICHIKAWA M. Production of fine powder of yttrium aluminum garnet [P]. *Japan Patent*: 10-10411, 1998-04-21.
- [8] YANAGITANI T, YAGI H, HIRO Y. Production of yttrium aluminum garnet powder [P]. *Japan Patent*: 10-114519, 1998-05-06.