

中国激光

布里渊激光器功率突破 20 W

具有窄线宽的激光器在激光干涉引力波探测 (LIGO)、精密激光光谱和微波光子学等领域有着重要的应用,尤其是高功率、低噪声、高光束质量的极窄线宽激光光源已成为前沿科学探索中的有力工具。但是自由振荡的激光器受到工作物质的固有增益线宽、谐振腔的相位噪声、机械振动、温度抖动等环境因素的制约,难以直接获得窄线宽激光输出。基于受激布里渊散射 (SBS) 效应的布里渊激光器,利用 SBS 光波场与声波场之间频率和动量固有的相位匹配引起的光谱窄化效应来获取极窄线宽、低噪声激光已经成为了重要的途径。目前,导波结构是产生布里渊激光的主要途径:2009 年,加州理工学院利用 CaF_2 回音壁腔结构实现了功率 μW 量级的布里渊激光输出;2009 年,罗彻斯特大学在掺镱光纤激光器中实现了 1 W 的布里渊激光输出,是已知导波结构中获得的最高布里渊激光输出功率;2011 年,悉尼大学基于片上结构 As_2S_3 脊型波导实现了功率约为 $150 \mu\text{W}$ 的布里渊激光输出;2018 年,耶鲁大学报道了硅基波导结构的布里渊激光器,输出功率约为 $170 \mu\text{W}$;同年,加州大学圣巴巴拉分校在 Si_3N_4 波导中实现了级联布里渊激光输出,其中一阶 Stokes 光演化功率约为 20 mW,线宽为

0.7 Hz。导波结构易获得低阈值的布里渊激光输出,但由于腔内光束模体积极小、级联 SBS 难以控制,且工作波长受其固有结构和 SBS 介质限制,无法在保证单频运转的同时实现功率缩放和波长拓展。

通过自由空间传输实现布里渊激光运转能够克服上述导波结构面临的技术瓶颈,成为实现高功率窄线宽激光输出的潜在技术路径。但受传统 SBS 介质的增益特性、光学特性及热物性限制,在导波结构布里渊激光器快速发展的几十年中,自由空间运转的布里渊激光器却几乎停滞不前。2020 年,本课题组在国际上首次测得金刚石晶体的布里渊增益系数高达 79 cm/GW (为熔石英和 CaF_2 晶体的近 20 倍、单晶硅的 300 多倍),结合金刚石晶体超宽的光谱透过范围 ($>0.2 \mu\text{m}$ 全波段透射) 以及极高的热导率 [$2200 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$], 为传统晶体材料的 50~100 倍), 其成为实现高功率、高效率 and 极宽工作光谱范围布里渊激光输出的理想介质。

近日,本课题组利用 $1 \mu\text{m}$ 波段连续波光纤激光器作为泵浦源,将以布儒斯特角切割的 5 mm CVD 单晶金刚石作为布里渊增益介质,通过 PDH 稳频的环形腔实现泵浦光和 Stokes 光的双谐振,实验原理及实验结构如图 1 所示 (图 1 中 W_{FSR} 为自由

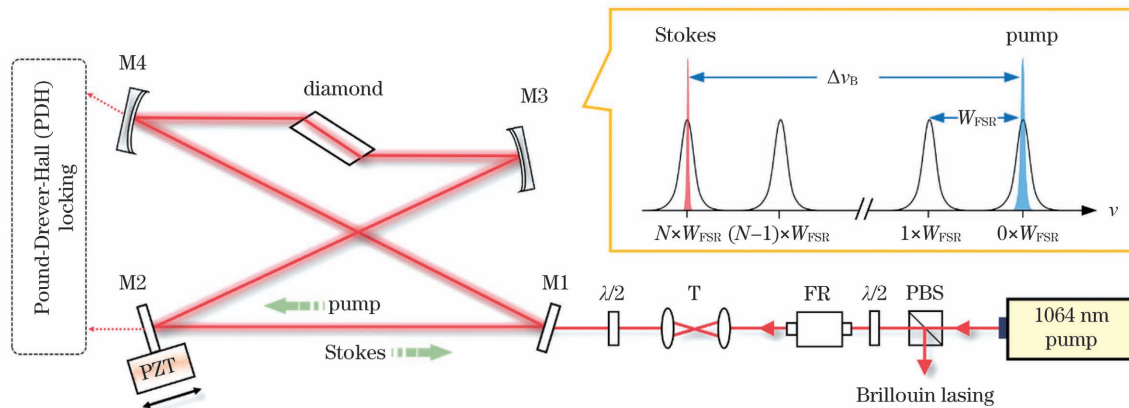


图 1 双谐振环形腔金刚石布里渊激光器示意图

Fig. 1 Schematic of diamond Brillouin laser based on double resonance ring cavity

光谱范围)。实验中产生的后向传输的 Stokes 光经由光隔离器输出,在 60 W 的有限泵浦功率条件下,实现了功率高达 20.3 W、转换效率为 33.8% 的近衍射极限布里渊激光输出,光束质量因子 $M^2 < 1.1$,在最大输出功率下测得的输出功率特性及光斑如图 2(a) 所示;同时测得的布里渊激光信噪比大于 63 dB,相比于泵浦光提高了 21 dB,见图 2(b)。这是目前报道的连续波运转布里渊激光器的最高功率,相对于以往导

波结构所报道的最高功率 1 W 提高了 20 倍;此外,结合金刚石晶体出色的热物性,通过增加注入泵浦光功率将有望进一步提升布里渊激光功率。

本研究结果表明,自由空间运转的金刚石布里渊激光器为实现高功率、超窄线宽、高信噪比单频激光输出提供了一种新的技术路径,将其与超窄线宽激光测量及稳频技术结合,有望在长距离高精度激光干涉测量、量子光学等领域发挥重要的应用。

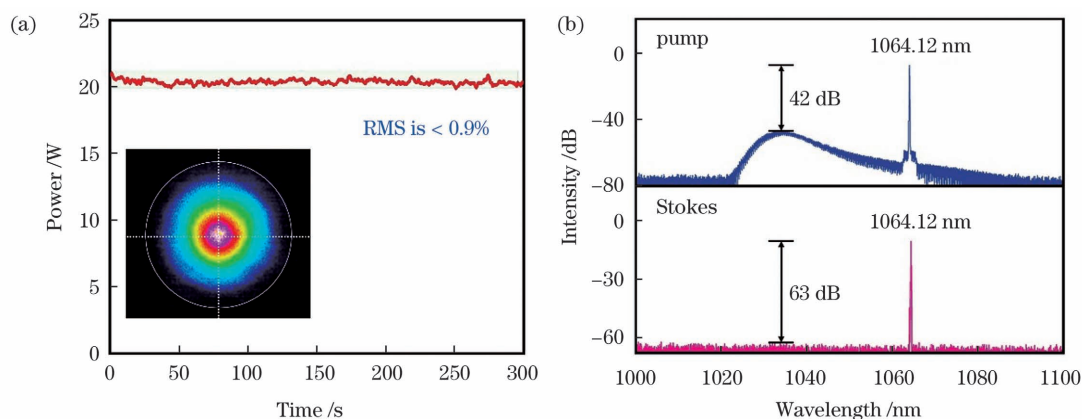


图 2 布里渊激光输出特性。(a)最高输出功率时的功率稳定性(插图:近场光斑);(b)泵浦光和布里渊激光光谱特性对比
Fig. 2 Brillouin laser output characteristics. (a) Power stability at maximum output power (inset: near-field spot);
(b) comparison of spectral characteristics between pump laser and Brillouin laser

白振旭^{1,2,3*}, 金舵^{1,2}, 丁洁^{1,2}, 齐瑶瑶^{1,2}, 杨学宗^{3,4}, Richard P. Mildren³,
王雨雷^{1,2}, 吕志伟^{1,2}

¹河北工业大学先进激光技术研究中心, 天津 300401;

²河北省先进激光技术与装备重点实验室, 天津 300401;

³麦考瑞大学物理与天文系光子研究中心, 悉尼 2109;

⁴国科大杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024

通信作者: *zxbai@hebut.edu.cn

收稿日期: 2021-08-05; 修回日期: 2021-08-10; 录用日期: 2021-08-16