

中国激光

国产金刚石实现峰值功率 MW 的拉曼激光输出

金刚石晶体作为自然界最坚硬的物质,不但其化学性质稳定,且具有极宽的光谱透过范围($>0.23\ \mu\text{m}$)、超高的热导率($>2000\ \text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)和低热膨胀系数($\sim 1.1\times 10^{-6}\ \text{K}^{-1}$)等优异的光学性能和热物性。结合金刚石晶体高的拉曼增益系数($\sim 10\ \text{cm}/\text{GW}@1\ \mu\text{m}$)和大的拉曼频移($1332.3\ \text{cm}^{-1}$)等突出的非线性光学特性,金刚石晶体在产生高功率特殊波长激光方面具有巨大的优势。特别是随着人造金刚石晶体生产工艺的提升,目前金刚石拉曼激光器已经实现了波段覆盖紫外、可见光、近红外以及中红外波段,脉冲宽度从连续波到短至飞秒的高功率拉曼激光输出。金刚石拉曼激光器已经获得了稳态功率高达 kW 的运转,但是受光学级金刚石晶体的生长尺寸制约,金刚石晶体中心小的模体积使得其可承受的泵浦能量遇到了一定的瓶颈,因此短脉冲泵浦条件下的金刚石拉曼激光输出能量通常仅在 μJ 至 mJ 量级。近年来国内人造金刚石晶体尺寸达到了 $1\ \text{cm}^3$ 以上,其中光学级金刚石晶体的有效通光面积接近 $1\ \text{cm}^2$,且生长成本大幅降低,这对于提升金刚石拉曼振荡器的泵浦

光耦合兼容性以及提高能量负载起到了重要的推动作用,有望助力金刚石激光器的国产化和产业化发展。

近日,河北工业大学采用国产 $4\ \text{mm}\times 4\ \text{mm}\times 7\ \text{mm}$ 大尺寸化学气相沉积(CVD)单晶金刚石晶体作为拉曼增益介质,通过设计大口径的光泵浦振荡器结构,实现了峰值功率大于 $1.5\ \text{MW}$ 的纳秒拉曼激光输出。实验装置结构如图 1 所示:泵浦光为电光调 Q 的 $1064\ \text{nm}$ 纳秒激光器;为了提高金刚石的泵浦光负载,利用透镜组 F1 和 F2 将泵浦光调制成直径约为 $2500\ \mu\text{m}$ 的平行光;二分之一波片用于调节泵浦光的偏振方向。拉曼振荡器采用平平腔结构,腔长仅为 $15\ \text{mm}$,其中输入镜(IC)对 $1064\ \text{nm}$ 泵浦光高透、对 $1240\ \text{nm}$ 一阶 Stokes 光高反射,输出镜(OC)对 $1\ \mu\text{m}$ 泵浦光高反射、对一阶 Stokes 光部分透射(透射率为 50%)。实验中采用的金刚石晶体未镀膜,其生长方向为 $[110]$,放置在拉曼振荡器的中心处;二分之一波片调节泵浦光偏振方向与金刚石的 $\langle 111 \rangle$ 轴平行;长通滤光片(LPF)用于滤除剩余的泵浦光。

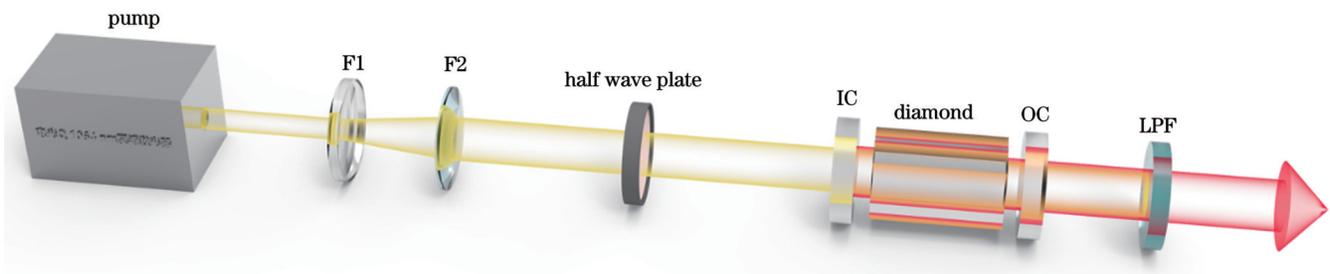


图 1 高功率金刚石拉曼激光器示意图

Fig. 1 Schematic of high-power diamond Raman laser

拉曼光的输出能量随泵浦能量的变化曲线如图 2(a)所示,阈值功率约为 $8\ \text{mJ}$,当最大泵浦能量为 $45\ \text{mJ}$ 时,得到了 $11.2\ \text{mJ}$ 的拉曼激光输出,对应的转换效率约为 25% 。根据图 2(b)所示的波形可以看出,最大输出能量时的拉曼脉宽约为 $7\ \text{ns}$,对应的最大峰值功率为 $1.6\ \text{MW}$ 。图 2(b)中的插图为输出 Stokes 光谱,中心波长在 $1240\ \text{nm}$ 附近,与 $1064\ \text{nm}$ 泵浦的金刚

石拉曼频移相吻合。

本研究验证了国产大尺寸人造光学级 CVD 金刚石晶体在实现高功率拉曼激光输出上的可行性。后续通过提升晶体生长工艺、优化振荡器参数和泵浦耦合参数,有望进一步提升金刚石拉曼激光器的性能,并推动高功率特殊波长激光技术的发展以及国产金刚石晶体在非线形激光领域中的应用。

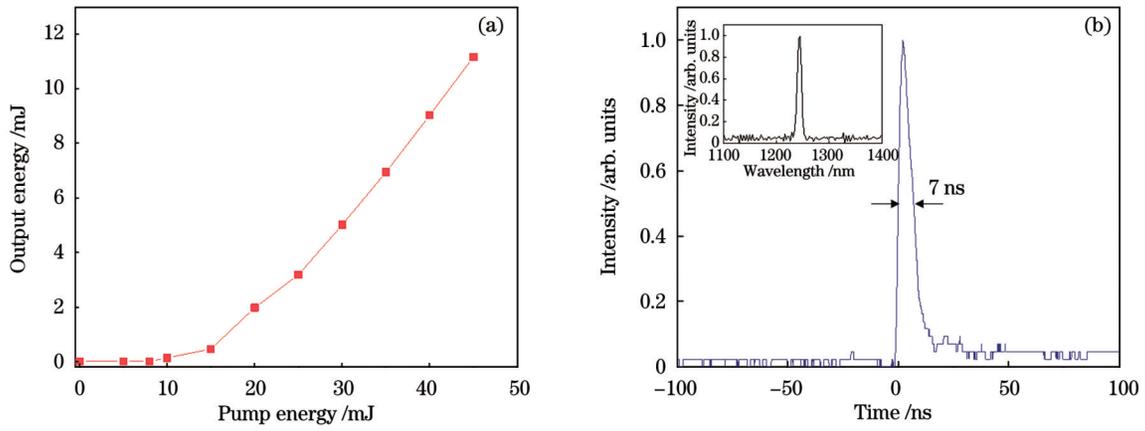


图2 输出特性。(a)拉曼输出能量随泵浦能量的变化;(b)最大泵浦能量下的拉曼输出波形(插图为拉曼输出光谱)

Fig. 2 Output characteristics. (a) Output Raman laser energy versus pump energy; (b) output Raman laser waveform at maximum pump energy with output Raman spectrum shown in inset

陈晖^{1,2}, 郝鑫^{1,2}, 石澳昆^{1,2}, 杨学宗^{3,4}, 丁洁^{1,2}, 齐瑶瑶^{1,2}, 颜秉政^{1,2}, 王雨雷^{1,2}, 吕志伟^{1,2*}, 白振旭^{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国科大杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024;

⁴国防科技大学脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037

通信作者: *zhiweilv@hebut.edu.cn; **zxbai@hebut.edu.cn

收稿日期: 2023-11-06; 修回日期: 2023-11-07; 录用日期: 2023-11-09; 网络首发日期: 2023-11-16