

基于负曲率空芯光纤的光泵太赫兹光纤激光器的理论研究

张果^{1,2}, 孙帅^{1,2}, 张尧^{1,2}, 盛泉^{1,2}, 史伟^{1,2}, 姚建铨^{1,2}

(1. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院 激光与光电子研究所, 天津 300072;
2. 天津大学 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 针对紧凑型、高效的光泵太赫兹激光器(OPTL)技术,设计了基于负曲率空芯光纤的长腔型光泵太赫兹光纤激光器(OPTFL)结构。该 OPTFL 以聚甲基戊烯(PMP)材料的空芯光纤为工作气室,填充甲醇气体作为工作物质,采用连续 9P(36)支 CO₂激光器为泵浦源。从速率方程理论和空芯光纤的传输理论出发,分析了影响OPTFL 输出特性的因素,并对负曲率空芯光纤内部微结构进行了探索,通过调整内部结构,能够实现较低损耗的单模太赫兹激光传输。结合设计的负曲率空芯光纤,对长腔型 OPTFL 的可行性进行了分析,理论计算表明,在最佳工作条件下,通过适当增加谐振腔长度,太赫兹激光输出功率有望达到百毫瓦量级。研究结果为高功率、高性能的 OPTFL 提供了一种新的方法与理论指导。

关键词: 太赫兹激光器; 负曲率空芯光纤; 速率方程; 单模

中图分类号: TN242 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA202049.0205001

Theoretical investigation on optically pumped THz fiber laser based on negative curvature hollow-core fiber

Zhang Guo^{1,2}, Sun Shuai^{1,2}, Zhang Yao^{1,2}, Sheng Quan^{1,2}, Shi Wei^{1,2}, Yao Jianquan^{1,2}

(1. The Institute of Laser & Opto-electronics, School of Precision Instrument & Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology(Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Based on the compact and efficient optically pumped terahertz laser (OPTL) technology, an optically pumped terahertz fiber laser (OPTFL) based on a negative curvature hollow core fiber was designed. This OPTFL used a hollow-core fiber with polymethylpentene (PMP) material as operation gas chamber and was filled with methanol gas and pumped by 9P (36) continuous-wave (CW) CO₂ laser. Based on rate equations and the transmission theory in hollow core fiber, factors affecting the output characteristics of OPTFL were analyzed. By investigating inner microstructure of hollow-core fiber, a negative curvature hollow-core fiber for efficiently transmitting terahertz waves was proposed. Considering the designed negative curvature hollow-core fiber, the feasibility of long cavity OPTFL was analyzed. Theoretical calculations showed that by appropriately increasing the cavity length of the proposed OPTFL, the terahertz output power was expected to reach the order of 100 milliwatts with optimal operating conditions. The results provide a new method for the OPTFL with high power and high performance.

Key words: terahertz laser; negative curvature hollow-core fiber; rate equations; single mode

收稿日期: 2019-10-05; 修訂日期: 2019-11-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2014CB339802)

作者简介: 张果(1996-), 男, 硕士生, 主要从事太赫兹激光器及光子晶体光纤方面的研究。Email: zhangguo@tju.edu.cn

导师简介: 史伟(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高性能大功率光纤激光器、非线性光学和太赫兹光子学方面的研究。

Email: shiwei@tju.edu.cn

0 引言

太赫兹(Terahertz, THz)波是指频率为0.1~10 THz, 相应波长范围在 30 μm~3 mm 的电磁波^[1]。THz 波在医学成像、环境监测、安全检查、雷达、大气遥感以及基础物理研究等领域具有广阔的应用前景和重大的科学价值^[2-6]。在过去的几十年里, THz 辐射源取得了重大的进展, 极大地加速了 THz 技术的研发与应用。目前 THz 辐射源主要利用电子学方法和光学方法产生, 其中具有代表性的 THz 辐射源实现方法有: 自由电子激光器(free electron laser, FEL)、超短激光脉冲产生 THz 辐射、量子级联激光器(quantum cascade laser, QCL)、参数振荡器产生 THz 辐射、基于电子学振荡的 THz 辐射源、光泵 THz 激光器(optically pumped THz laser, OPTL)等。然而, 以上多数辐射源需要苛刻的工作环境以及高昂的运行成本, 只有少数研究成果走出实验室而得到了实际应用。OPTL 可输出高功率、高光束质量的 THz 激光, 并且可以在室温下长时间稳定工作, 运行成本相对较低, 是目前应用最广泛的太赫兹辐射源之一。

20 世纪 70 年代, 美籍华裔学者张道源 (T. Y. Chang) 等人首次报道了 OPTL, 标志着 OPTL 的诞生^[7]。之后的几十年里 OPTL 的输出功率以及稳定性都有了一定的提高, 但能量转换效率一直无法得到有效的提升, 导致高功率 OPTL 的体积较为庞大, 而诸如医疗成像、THz 安检成像等急需轻量化的 THz 激光器。近年来, 科研人员研究了各种具有较大内部空芯体积的空芯光纤^[1-3], 并将部分作为光泵气体激光器的工作气室, 极大地缩减了光泵气体激光器的体积。2010 年美国的 A. V. V. Nampoothiri 等人报道了光泵乙炔(C_2H_2)气体的中红外光纤激光器, 实现了 3 123.2 nm 和 3 162.4 nm 双波长激光输出^[8]; 在随后的几年里该团队通过调整作用气体等手段, 实现了多个波段的激光输出^[9]; 2016 年天津大学首次提出了基于光子晶体光纤的紧凑型光泵甲醇气体 THz 激光器, 并对其进行了理论分析^[10]; 2018 年国防科技大学报道了光泵乙炔气体的光纤激光器, 其输出波长在 3.09~3.21 μm 范围连续可调, 连续输出功率最高为 0.77 W^[11]。目前这类光泵光纤激光器的研究主要还集中在中红外波段, 而在 THz 波段的应用相对

较少。随着研究的深入, 基于空芯光纤的光泵气体光纤激光器的输出功率以及能量转换效率已经得到了很大的提高, 这为轻量化的高功率光泵太赫兹光纤激光器 (optically pumped THz fiber laser, OPTFL) 提供了极具潜力的发展方向。

文中设计了一种基于负曲率空芯光纤的长腔结构 OPTFL, 使用甲醇(CH_3OH)气体作为工作物质, 在连续 9P(36) 支 CO_2 激光泵浦下, 该 OPTFL 可输出 2.52 THz(118.9 μm) 激光, 并且文中模拟计算都是依据此频率进行研究。理论分析了激光器内部的工作过程, 结合速率方程和空芯光纤传输理论, 建立了三能级模型, 并对负曲率空芯光纤内部损耗特性进行了分析, 从数值上给出了激光器的最佳工作条件, 为高功率、高性能的 OPTFL 提供合理的设计以及理论支撑。

1 装置结构设计

文中设计的 OPTFL 装置图如图 1 所示。其中泵浦源为高稳定性的连续可调谐 CO_2 激光器, 外接闭环的反馈控制进行频率调节。L1 和 L2 分别为硒化锌(ZnSe)材料的凸透镜和凹透镜, 主要控制 CO_2 激光光束的空间方向性, 减小泵浦光在进行空间耦合输入时的损耗。M1 为泵浦光输入耦合镜, M2 为太赫兹激光输出耦合镜。S1 和 S2 分别为两端预留的 0.5 m 未弯曲的直光纤, 用来提高太赫兹输出光束质量并防止泵浦光功率过高时损伤光纤。

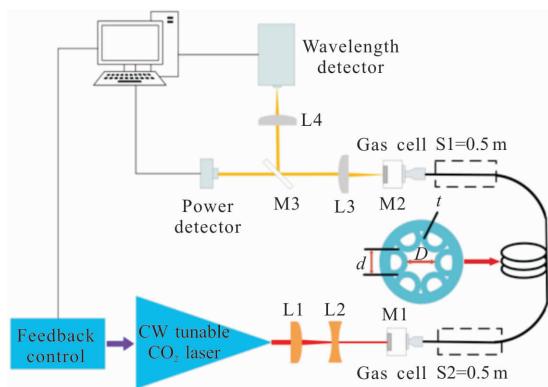


图 1 光泵气体太赫兹光纤激光器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the OPTFL

图 1 中的插图为文中设计的负曲率空芯光纤横截面示意图, 光纤内部空芯直径为 D , 包层薄壁管的

直径和厚度分别为 d 和 t 。光纤所用材料为聚甲基戊烯(PMP), PMP 材料具有良好的热性能, 能够承受更高的泵浦光功率, 并且 PMP 材料对 2.5 THz 波段的吸收损耗也低于常见的环烯烃共聚物(COC)^[12]、高密度聚乙烯(HDPE)^[13]等材料。

2 理论模型

文中提出了用于OPTFL 的空芯光纤, 计算时采用的空气孔直径 D 处于 400~2 000 μm 之间, 远小于传统大尺寸 OPTL 谐振腔的直径, 因此在理论计算时忽略 OPTFL 中光横模的强度分布。光泵甲醇气体的三能级工作示意图如图 2 所示, Γ_r 为转动弛豫速率, Γ_k 和 $\Gamma_{v-\text{TR}}$ 分别为工作分子碰撞到其他 K 值能级和相互碰撞后的消激发速率, Γ 为振动激发态的工作分子弛豫到振动基态的速率。THz 波在负曲率空芯光纤中依靠反谐振原理进行传播, 从而减少了工作分子由于热扩散到波导壁转化为内能造成的损耗, 因此文中忽略了工作分子与波导壁碰撞的消激发速率 Γ_{coll} 。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dn_3}{dt} &= -\sigma_{\text{IR}} I_{\text{IR}} (n_3 - n_1 g_3/g_1) - \Gamma_r n_3 + \alpha_3 \Gamma_r n_K^{\text{exc}} - \Gamma(n_3 - n_3^e) \\ \frac{dn_1}{dt} &= -\sigma_{\text{IR}} I_{\text{IR}} (n_3 - n_1 g_3/g_1) - \Gamma_r n_1 + \alpha_1 \Gamma_r n_K^{\text{gnd}} - \Gamma(n_1 - n_1^e) \\ \frac{dn_K^{\text{exc}}}{dt} &= -\sigma_{\text{IR}} I_{\text{IR}} (n_3 - n_1 g_3/g_1) - \Gamma_r n_K^{\text{exc}} + \alpha_K \Gamma_r N^{\text{exc}} - \Gamma(n_K^{\text{exc}} - n_K^{\text{exc},e}) \\ \frac{dn_K^{\text{gnd}}}{dt} &= -\sigma_{\text{IR}} I_{\text{IR}} (n_3 - n_1 g_3/g_1) - \Gamma_r n_K^{\text{gnd}} + \alpha_K \Gamma_r N^{\text{gnd}} - \Gamma(n_K^{\text{gnd}} - n_K^{\text{gnd},e}) \\ \frac{dN^{\text{exc}}}{dt} &= \Gamma_r n_K^{\text{exc}} - \alpha_K \Gamma_r N^{\text{exc}} - \Gamma(N^{\text{exc}} - N^{\text{exc},e}) \\ \frac{dN^{\text{gnd}}}{dt} &= \Gamma_r n_K^{\text{gnd}} - \alpha_K \Gamma_r N^{\text{gnd}} - \Gamma(N^{\text{gnd}} - N^{\text{gnd},e}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: σ_{IR} 为 CO_2 激光的均匀发射截面; α_K 为某一振动能级上 K 值能级的平衡分数; n_K^{exc} 和 n_K^{gnd} 分别为振动激发态和振动基态能级某一 K 值所对应的工作分子数; N^{exc} 与 N^{gnd} 分别为未参加三能级过程的振动激发态和振动基态剩余粒子数。

求解微分方程(1)得出光泵过程的饱和吸收强度的表达式:

$$I_s = \frac{h\nu_{\text{IR}}(\Gamma_r + \Gamma)(\Gamma_r + \Gamma_k \alpha_K + \Gamma)}{2\sigma_{\text{IR}}[m\Gamma(\Gamma_k + \Gamma_k \alpha_K + \Gamma) + \alpha_r \Gamma_r(\Gamma_k \alpha_K + \Gamma)]} \quad (2)$$

根据上式计算得出大尺寸 OPTL 和新型 OPTFL 中的饱和吸收光强, 计算结果见图 3 (1 mTorr=0.133 Pa)。

可见随着工作气压的增加以及光纤直径的减小,

发速率 Γ_{diff} 。

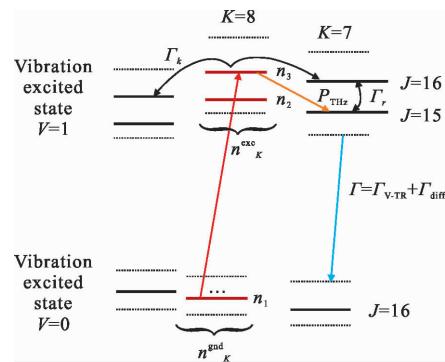


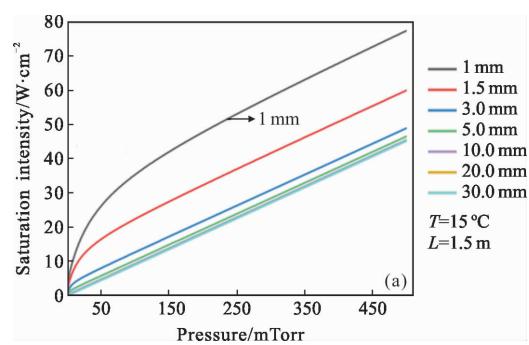
图 2 OPTFL 能级跃迁示意图

Fig.2 Energy-level transition diagram of OPTFL

光泵气体产生 THz 激光是由极性分子转动能级间跃迁产生, 工作分子对泵浦光的饱和吸收强度的计算包括转动、振动弛豫过程、工作分子间的碰撞消激发过程, 以及能级间的碰撞弛豫过程。参与激光过程中的各个能级间的粒子数满足以下速率方程^[14]:

饱和吸收强度逐渐增加。并且由图 3(a)和(b)可知, OPTFL 中的饱和吸收强度明显高于大尺寸的 OPTL。

饱和吸收光强对能量转换效率的影响主要在于其影响了工作分子对泵浦光的吸收, 工作物质对泵浦光的吸收系数 η 可写为^[14]:



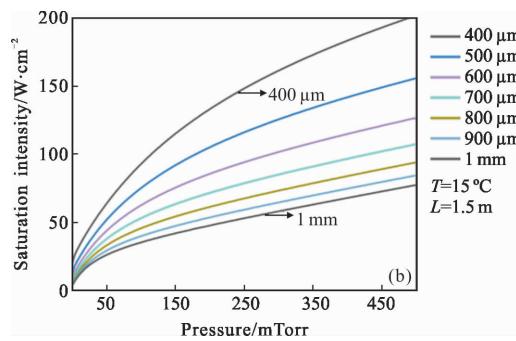


图 3 大尺寸 OPTL(a) 和 OPTFL(b) 中的饱和强度随压强的变化

Fig.3 Saturation intensity of bulky OPTL (a) and OPTFL (b) versus pressure

$$\eta = \frac{\alpha_0 e^{-\Delta^2 / \Delta v_D^2}}{(1 + I_{CO_2} / I_{SAT})^{1/2}} \quad (3)$$

式中: Δ 为泵浦光的失谐频率; Δv_D 为甲醇分子吸收谱线的多普勒加宽; α_0 为谱线中心不饱和吸收系数; I_{SAT} 为饱和吸收光子数通量, 并且 $I_{SAT}=I_s/h\nu_{CO_2}$ 。由公式(3)可知, 吸收系数主要由饱和吸收光子数通量 I_{SAT} 和泵浦光的失谐频率 Δ 决定, 饱和吸收光强越大, 则甲醇分子对泵浦光的吸收越高。图 4(a)为甲醇分子对 9P(36) 支 CO_2 激光的吸收系数随泵浦光失谐频率的变化情况图, 由图可知泵浦光频率波动越小, 甲醇分子对泵浦光的吸收系数越大, 频率在 2 MHz 内波动引起的吸收系数变化已经非常明显, 因此对泵浦光进行频率稳定控制就显得至关重要。

图 4 (b) 表明控制泵浦光的失谐频率在 1 MHz 以内时, 甲醇分子对泵浦光的吸收系数随光纤直径的减小而增大。吸收系数增大时, 参与激光工作过程中上能级粒子数增多, 使转动能级间反转粒子数增加, 从而提高了激光器的对泵浦光的利用率。因此减小光纤直径并控制泵浦光的频率稳定有助于提高 THz 激光器的能量转换效率。

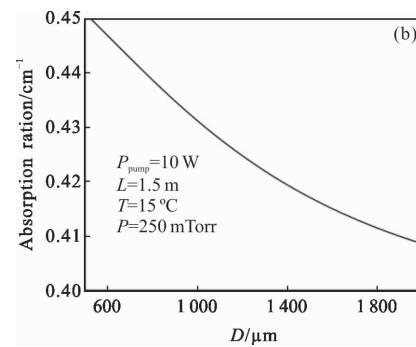
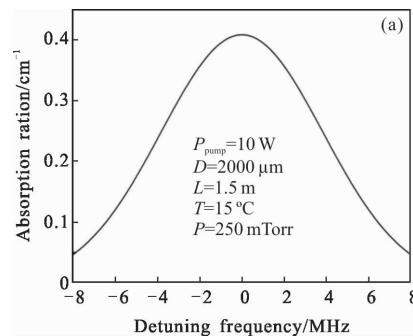


图 4 甲醇分子的吸收系数随失谐频率和光纤直径的变化

Fig.4 Absorption coefficient versus the detuning frequency and fiber diameter

3 腔内损耗与增益情况

THz 波在负曲率空芯光纤中的损耗主要包括其固有的材料损耗以及限制损耗。利用有限元仿真软件 COMSOL 对负曲率空芯光纤进行分析得知, THz 波在负曲率空芯光纤中的损耗以及单模特性主要与包层薄壁管的结构有关, 文中利用减小外包层直径的手段获得了具有低损耗、高单模特性的负曲率空芯光纤。图 5 为负曲率空芯光纤横截面图和限制损

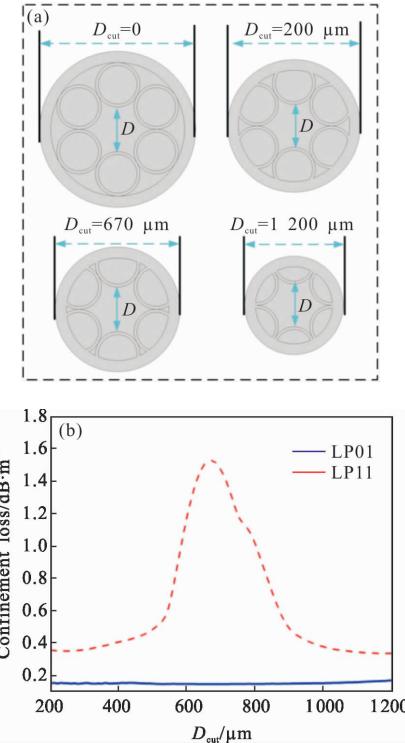


图 5 HC-PCF 横截面和传输损耗随缩减长度的变化

Fig.5 HC-PCF cross-section structure and confinement loss change with D_{cut}

耗随缩减长度的变化情况图,一般来说,内部空芯直径越大则损耗越小。为了提高作用气体对泵浦光的饱和吸收强度的同时保持较小的损耗,文中选用内部空芯直径 D 为 2 000 μm ,包层薄壁管直径 d 为 1 000 μm ,厚度 t 为 132 μm , D_{cut} 为外包层向内缩减的尺寸。

图 5(a)为外包层缩减尺寸分别为 0、200、670、1 200 μm 时的光纤横截面示意图,图 5(b)为高阶模(LP11)损耗和基模(LP01)损耗与向内缩减尺寸 D_{cut} 之间的关系图。由图 5(b)可见,当 D_{cut} 在 500~900 μm 范围逐渐变化时,纤芯中的高阶模式与包层中的模式会形成谐振,造成高阶模大量泄漏到包层中,当 D_{cut} 为 670 μm 时,此时高阶模谐振作用最强,损耗远高于基模损耗,同时基模损耗低于 0.2 dB/m,此时光纤的设计在损耗较低的情况下同时具备良好的单模特性,同时内缩后光纤的直径也相应的减小。

图 6 为空芯光子晶体光纤 LP01 模的弯曲损耗特性图,当弯曲半径逐渐增加时,相应的弯曲损耗减小,但在弯曲半径为 20 cm 左右时损耗有一个峰值,此时的空芯部分与包层的谐振增强,因此导致弯曲损耗增加,这也与相关研究符合^[15]。图 6 中插图分别为弯曲半径在 10、12、15、17、20、30 cm 下的模场分布情况。可以看出,当光纤的弯曲半径在 30 cm 左右时,有比较好的模场特性,并且此时弯曲损耗也低于 0.5 dB/m,继续增加弯曲半径时损耗减小并不明显,因此文中在计算时选择弯曲半径为 30 cm。

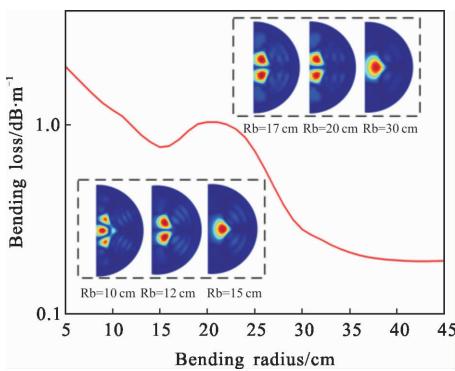


图 6 弯曲损耗随弯曲半径的变化

Fig.6 Bend-loss as a function of bending radius

要实现 THz 激光输出,小信号增益必须大于腔内损耗,OPTFL 的小信号增益系数可由下式计算:

$$\gamma = \frac{4\pi}{3h\varepsilon_0\lambda_{ij}\Delta\nu} \mu_{ij}^2 \left(n_i - \frac{g_i}{g_j} n_j \right) \quad (4)$$

式中: $\Delta\nu$ 为洛伦兹线宽; μ_{ij} 为跃迁过程的电偶极距; g_i 和 g_j 分别为两个能级的统计权重。一般反转粒子数密度和洛伦兹线宽的比值为 $10^{11} \sim 10^{12} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{MHz}^{-1}$,利用典型值代入公式(4)中求解小信号增益系数,最终获得小信号增益系数能够达到 $0.01 \sim 10 \text{ m}^{-1}$ (0.04~43 dB/m),总体增益大于 HC-PCF 内总损耗,因此能够实现有效的 THz 输出。

4 输出结果与讨论

基于以上讨论,THz 输出功率的表达式为^[16]:

$$P_{\text{THz}} = \frac{Q_c Q_q}{1 + g_3/g_2} \frac{\eta(I_{\text{CO}_2}) L}{\gamma_{\text{CO}_2} + \eta(I_{\text{CO}_2})} P_{\text{CO}_2} \quad (5)$$

式中: γ_{CO_2} 为 CO_2 激光的腔内损耗; η 为吸收系数; Q_q 为量子转化效率; Q_c 为整个 THz 谐振腔的效率, $Q_c = -0.5 \ln R / (\gamma_{\text{THz}} - 0.5 \ln R)$, R 为输出端的反射率; γ_{THz} 为 THz 的单程传输损耗与耦合损耗总和。当 OPTFL 在 CO_2 激光功率 10 W、工作温度 15 °C、THz 输出镜反射率 0.9 的条件下时,归一化 THz 激光输出功率随压强的变化如图 7 所示。当压强在 0~ H 范围内变化时,工作物质对泵浦光的吸收随着压强的升高而增加,因此激光功率逐渐增加;当压强继续增加超过 H 点时,气压展宽引起吸收饱和效应,扩散弛豫速率因光纤壁的限制随压强的升高而降低;并且气压升高时,过多的工作分子对泵浦激光反吸收作用增强,因而功率会出现下降的趋势。

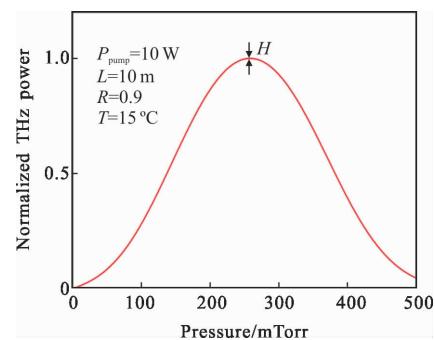


图 7 归一化 THz 激光输出功率随压强的变化

Fig.7 Normalized THz output power versus pressure

当 OPTFL 在 CO_2 激光功率 10 W、工作温度 15 °C、光纤空气孔直径 2 000 μm 、THz 输出镜反射率 0.9、工作气压 250 mTorr 条件下时,THz 输出功率随光纤长度及 CO_2 激光功率的变化如图 8 所示。

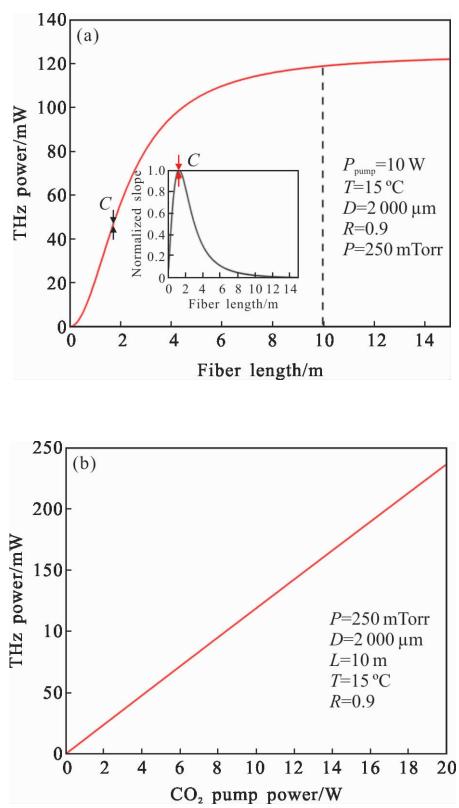
图 8 THz 激光输出功率随光纤长度及 CO₂ 激光功率的变化Fig.8 THz output power versus fiber length and CO₂ power

图 8(a)为 THz 激光功率随光纤长度的变化图, 插图给出了 THz 激光随着光纤长度增加而增加的归一化斜率曲线, 纵坐标为 THz 激光功率的增加速率。可以看出, 当光纤长度在 0~C 变化时, THz 激光输出功率随着光纤长度的增加而急剧增加。当光纤长度在超过 C 点之后, THz 输出功率随着光纤长度增加的速度逐渐放缓, 特别是当长度超过 10 m 后, 激光功率增加更加缓慢, 原因是随着光纤长度的增加, 工作分子总数增加, 对 THz 激光的反吸收增强, 并且过多的工作分子在振动激发态下能级聚集, 使下能级消激发速率减慢, 部分工作分子向其他 K 值转动能级上跃迁也对 CO₂ 激光有吸收作用, 此时在不增加缓冲气体的情况下, 功率增加相对缓慢。为了提高光纤利用率, 在以上参数条件下选择光纤的长度为 10 m, 图 8(b)为在工作气压 250 mTorr, 光纤直径 2000 μm, 长度 10 m, 弯曲半径 30 cm, 工作温度 15 °C, THz 输出反射率 0.9 的条件下, THz 输出功率随着泵浦光功率的变化情况图。计算表明, 泵浦光功率在 0~20 W 变化时, THz 输出功率基本呈现线性增加。

5 结 论

文中对基于负曲率空芯光纤的光泵气体太赫兹光纤激光器进行了研究, 将速率方程理论与空芯光纤传输理论相结合, 建立了适用于此结构下的三能级模型, 着重分析了影响 THz 转换效率的因素, 研究发现适当缩小光纤空气孔直径以及增加长度都能有效的提高能量转换效率。对光纤内部微结构进行了研究, 通过外包层内缩的方式减小了光纤的直径, 研究表明这种结构在保持较大空气孔的同时还具有较薄的包层管, 损耗低于 0.2 dB/m, 并且具有良好的单模特性。设计了长腔结构的 OPTFL, 理论计算表明在光纤弯曲半径为 30 cm、长度为 10 m、工作气压 250 mTorr、连续 CO₂ 激光功率 10 W 的条件下, THz 激光的输出功率可达百毫瓦量级。研究结果为紧凑型, 高性能的 OPTFL 提供了参考。

参 考 文 献:

- [1] Chengli Wei, Joseph Weiblen R, Curtis R. Menyuk, et al. Negative curvature fibers [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2017, 9(3): 504–561.
- [2] Poletti, Francesco. Nested antiresonant nodeless hollow core fiber [J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 23807–23828.
- [3] Hartung A, Kobelke J, Schwuchow A, et al. Low-loss single-mode guidance in large-core antiresonant hollow-core fibers [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(14): 3432–3435.
- [4] Kai Z, Wei S, Xu D G, et al. Optically pumped terahertz sources [J]. *Science China Technological Sciences*, 2017, 60(12): 1801–1818.
- [5] Wang Maorong, Zhong Kai, Liu Chu, et al. Radar cross section measurement of standard targets at 3.11 THz [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(2): 0225001. (in Chinese)
王茂榕, 钟凯, 刘楚, 等. 3.11 THz 标准体雷达散射截面测量 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(2): 0225001.
- [6] Pan Wu, Zeng Wei, Zhang Jun, et al. Design of multilayer stacked terahertz communication lens antenna [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(1): 65–72. (in Chinese)
潘武, 曾威, 张俊, 等. 堆叠型太赫兹通信透镜天线设计 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 65–72.
- [7] Guo Lihan, Wang Xinke, Zhang Yan. Terahertz digital holographic imaging of biological tissues [J]. *Optics and*

- Precision Engineering**, 2017, 25(3): 611–615. (in Chinese)
郭力菡, 王新柯, 张岩. 生物组织的太赫兹数字全息成像 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(3): 611–615.
- [8] Wang Yuye, Chen Linyu, Xu Degang, et al. Advances in terahertz three-dimensional imaging techniques [J]. **Chinese Optics**, 2019, 12(1): 1–18. (in Chinese)
王与烨, 陈霖宇, 徐德刚, 等. 太赫兹波三维成像技术研究进展 [J]. 中国光学, 2019, 12(1): 1–18.
- [9] Hu Weidong, Ji Jinjia, Liu Ruiting, et al. Terahertz atmosphere remote sensing [J]. **Chinese Optics**, 2017, 10(5): 656–665. (in Chinese)
胡伟东, 季金佳, 刘瑞婷, 等. 太赫兹大气遥感技术 [J]. 中国光学, 2017, 10(5): 656–665.
- [10] Chang T Y, Bridges T J. Laser action at 452, 496, and 541 μm in optically pumped CH_3F [J]. **Optics Communications**, 1970, 1(9): 423–426.
- [11] Nampoothiri A V V, Ratanavis A, Campbell N, et al. Molecular C₂H₂ and HCN lasers pumped by an optical parametric oscillator in the 1.5-microm band [J]. **Optics Express**, 2010, 18(3): 1946–1951.
- [12] Nampoothiri A V V, Beygi Azar Aghbolagh F, Debord B, et al. High photon conversion efficiency continuous wave lasing in an optically pumped I₂ hollow fiber gas laser in the visible region [J]. **Applied Optics**, 2017, 56(34): 9592–9595.
- [13] Yan D, Zhang H, Xu D, et al. Numerical study of compact terahertz gas laser based on photonic crystal fiber cavity [J]. **Journal of Lightwave Technology**, 2016, 34(14): 3373–3378.
- [14] Zhou Zhiyue, Tang Ni, Li Zhixian, et al. High-power tunable mid-infrared fiber gas laser source by acetylene-filled hollow-core fibers [J]. **Optics Express**, 2018, 26 (15): 19144–19153.
- [15] Ji Jiangjun, Kong Depeng, Ma Tian, et al. Design and fabrication of cyclic-olefin copolymer based hollow-core microstructured terahertz fiber [J]. **Infrared and Laser Engineering**, 2014, 43(6): 1909–1913. (in Chinese)
姬江军, 孔德鹏, 马天, 等. 环烯烃共聚物空芯微结构太赫兹光纤的设计与制造 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1909–1913.
- [16] Lei Jingli, Hou Shanglin, Yuan Peng, et al. Investigation on terahertz wave transmission in polyethylene photonic crystal fibers with triangle core [J]. **Infrared and Laser Engineering**, 2018, 47(S1): S120004. (in Chinese)
雷景丽, 侯尚林, 袁鹏, 等. 聚乙烯三角芯光子晶体光纤的太赫兹波传输研究 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(S1): S120004.
- [17] Detemple T, Danielewicz E. Continuous-wave CH_3F waveguide laser at 496 μm : Theory and experiment [J]. **IEEE Journal of Quantum Electronics**, 1976, 12(1): 40–47.
- [18] Frosz M H, Roth P, Günendi M C, et al. Analytical formulation for the bend loss in single-ring hollow-core photonic crystal fibers [J]. **Photonics Research**, 2017, 5(2): 91–94.
- [19] Zhang H, Liu M, Zhang Y. Output power enhancement of optical pumped gas waveguide terahertz laser by promoting vibrational de-excitation [J]. **Optics Communications**, 2014, 326(5): 29–34.