

文章编号: 0258-7025(2008)02-0200-06

产生太赫兹辐射源的 Nd:YAG 双波长准连续激光器

郑芳华^{1,2} 刘欢^{1,2} 李喜福³ 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 天津大学教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072; ³ 天津大学自动化学院, 天津 300072

摘要 产生太赫兹波辐射的方法可分为电子学和光子学两大类。在光子学领域,非线性光学差频方法是获取高功率、低成本、便携式、室温运转太赫兹波的主要方法之一。实验研究了激光二极管(LD)端面抽运 Nd:YAG 1319 nm/1338 nm 双波长准连续线偏振运转激光器,理论计算了输出双波长在非线性晶体 DAST(4-N,N-dimethylamino-4'-N'-methyl-stilbazolium tosylate)中差频产生太赫兹辐射的平均功率。在重复频率 50 kHz 时,双波长激光平均输出功率达到 2.22 W,斜率效率 12.72%,线偏振度 0.983,脉冲宽度 71.91 ns。 M^2 因子仅为 1.165,不稳定性小于 0.487%。根据非线性差频理论,计算出可在 1 mm 厚 DAST 晶体中获得 4.71 mW 的 3.23 THz 高相干性太赫兹波辐射。这两条非常接近的谱线为进一步通过非线性光学差频方法获得高相干性太赫兹波提供了理论基础。

关键词 激光器;Nd:YAG 双波长激光器;非线性光学差频;太赫兹波

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

Simultaneous Dual-Wavelength Quasi-Continuous-Wave Laser-Diode-End-Pumped Nd:YAG Laser for Terahertz Wave Source

Zheng Fanghua^{1,2} Liu Huan^{1,2} Li Xifu³ Yao Jianquan^{1,2}

¹ College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering,
Institute of Laser and Optoelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China
² Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology,
Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China
³ College of Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract The methods to generate terahertz (THz) waves can be divided into electronics and photonics. We use nonlinear optical difference frequency generation to obtain THz waves which belongs to photonics method. It is portable and run at room temperature, with high power and low cost. A simultaneous dual-wavelength quasi-continuous wave (CW) laser-diode-end-pumped Nd:YAG laser polarized operating at 1319 nm and 1338 nm has been demonstrated and the laser at 1064 nm is suppressed successfully. A total polarized quasi-CW output power of 2.22 W is obtained at a pump power of 20 W with a pulse repetition rate of 50 kHz, and the slope efficiency is 12.72%. The corresponding pulse width is 71.91 ns. The beam quality factor M^2 is as low as 1.165 and the instability of the output power is less than 0.487% at the polarized wave output power of 2.17 W. Using the simultaneous dual-wavelength laser, the highly coherent THz wave radiation of 3.23 THz will be generated by nonlinear optical difference frequency method in DAST (4-N,N-dimethylamino-4'-N'-methyl-stilbazolium tosylate) crystal. The ideal output peak power is 4.71 mW. The simultaneous dual-wavelength laser provides theoretically basis for generating highly coherent terahertz wave radiation by nonlinear optical difference frequency method.

Key words lasers; Nd:YAG dual-wavelength laser; nonlinear optical difference frequency generation; terahertz wave

收稿日期:2007-04-19; 收到修改稿日期:2007-09-24

基金项目:国家自然科学基金(10474071)和教育部博士点基金(20040056010)资助项目。

作者简介:郑芳华(1982—),女,河南人,硕士研究生,主要从事光电子技术方面的研究。

E-mail:yuanfeisix666@gmail.com

导师简介:姚建铨(1939—),男,上海人,中国科学院院士,教授,博士生导师,主要从事全固体激光及非线性光学频率变换技术方面的研究。E-mail:jyqao@tju.edu.cn

1 引言

太赫兹波一般是指频率在 $0.1 \sim 10$ THz, 对应波长为 $3000 \sim 30 \mu\text{m}$ 范围内的电磁波, 其波段位于电磁波谱中毫米波和远红外光之间, 是光子学技术与电子学技术的过渡领域。近十几年来, 有关太赫兹波辐射的研究引起了广泛的关注, 已逐渐成为各发达国家的重大研究方向, 而太赫兹辐射源的研究更是太赫兹技术研究的重点。产生太赫兹波辐射的方法可分为电子学和光子学两类。近年来, 非线性光学的飞速发展带动了基于光子学原理产生太赫兹技术的发展: 如基于周期微结构材料和固体非线性材料的光学参变振荡、光整流、光电导、光抽运、光学受激效应、表面发射效应、光学倍频及差频效应、光学切连科夫(Cherenkov)效应等非线性效应^[1]。其中, 利用非线性光学差频方法获得太赫兹辐射因其没有阈值、实验设备容易搭建、容易实现差频转换而成为研究热点^[2,3]。很多激光增益介质都有多条跃迁谱线, 只要进行合理的谐振腔设计^[4~6], 就可以在腔内同时产生两个甚至两个以上的波长振荡。其中, Nd:YAG 晶体具有优秀的物理化学和激光特性。基于 Nd:YAG 晶体的 1064 nm 固体激光器是目前应用最广泛的激光器。以 Nd:YAG 晶体为激光增益介质, 不仅能够获得高功率的 1064 nm , 1319 nm 和 946 nm 波长的激光输出, 还可以获得高功率的多波长激光同时输出。目前已有的报道主要是 1064 nm 和 946 nm , 1064 nm 和 1319 nm , 1319 nm 和 1338 nm 等双波长激光同时运转^[7~10]。

本文研究的双波长激光谱线分别是 $R_2 - X_1$ 跃迁, 辐射波长为 1318.8 nm ; $R_2 - X_3$ 跃迁, 辐射波长为 1338.2 nm 。已报道过侧面抽运 Nd:YAG 实现这两个波长的同时输出^[6,11]。进行了激光二极管(LD)端面抽运 Nd:YAG $1319 \text{ nm}/1338 \text{ nm}$ 双波长激光器的实验研究。为了利用 DAST ($4\text{-N, N-dimethylamino-4'-N'-methyl-stilbazolium tosylate}$) 晶体进行双波长差频产生高相干性太赫兹波, 在激光腔中插入一块布儒斯特片实现了双波长激光 $1319 \text{ nm}/1338 \text{ nm}$ 准连续偏振运转。

2 实验结果

为了获得较高的峰值功率, 采用声光调 Q 技术, 进行了双波长激光准连续运转的实验工作。实验结构如图 1 所示, 采用的谐振腔结构为简单凹平直腔。实验中所用的光纤输出激光二极管由德国

LIMO 公司生产, 中心波长在 808 nm 附近, 最大输出功率 30 W , 光纤芯径 $400 \mu\text{m}$, 数值孔径 0.22 。实验中所用的光学耦合系统可将抽运光聚焦成直径约为 $320 \mu\text{m}$ 的光斑, 对 808 nm 的透射率大于 90% , 工作距离 49.2 mm , 外径 37.2 mm , 长度 98.4 mm 。实验中所用激光晶体是一块键合 Nd:YAG 晶体, 晶体尺寸为 $\phi 3 \text{ mm} \times (3.8 + 10.2 + 3.8) \text{ mm}$, 晶体总长度 17.8 mm , 两端 3.8 mm 为非掺杂区, 中间 10.2 mm 为掺杂区, 掺杂原子数分数为 1.1% , 晶体表面镀有 1319 nm , 1338 nm 和 1064 nm 高透膜。声光(AO) Q 开关(QSGSU-10/Q)重复频率从 $0 \sim 50 \text{ kHz}$ 可调。输入镜为平凹镜, 曲率半径为 300 mm , 对 1319 nm 和 1338 nm 的反射率高于 99% , 实验中测量该输入镜对 808 nm 的透射率大于 70% 。输出镜为平镜, 对 1319 nm 和 1338 nm 的透射率分别为 10.282% 和 9.759% 。为了抑制 1064 nm 的寄生振荡, 输入镜和输出镜的膜层对 1064 nm 激光的透射率均大于 75% 。布儒斯特片(BP)以布氏角 56° 放置, 表面镀有对 p 偏振光高透 ($T = 98.787\%$), 对 s 偏振光高反 ($T = 1.3151\%$) 的膜系, 偏振度为 0.983 。实验中激光二极管抽运源水冷温度设定为 15°C , Nd:YAG 晶体水冷温度为 12°C , 声光 Q 开关水冷温度设定为 20°C 。

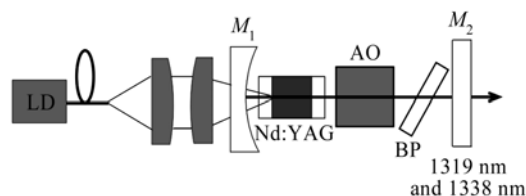


图1 实验结构图

Fig. 1 Experimental equipment

当注入抽运平均功率为 1.77 W 时, 双波长激光同时开始振荡。当注入抽运平均功率为 20 W 时, 获得了最大平均功率 2.22 W 的准连续 $1319 \text{ nm}/1338 \text{ nm}$ 双波长激光输出, 斜率效率为 12.72% 。具体激光输出特性如图 2 所示。图 2 中的注入抽运功率指的是抽运光通过输入镜后的功率值。

为了防止激光二极管的损坏, 在激光二极管实际注入平均功率 18.2 W 时观察双波长激光准连续输出光谱、各个波长的谱线宽度、输出功率的短期不稳定性以及在不同重复频率下的脉冲宽度。双波长激光准连续输出光谱如图 3(a) 所示。由图 3(b) 和 (c) 可知, 1319 nm 的激光谱线宽度为 0.23 nm , 1338 nm 的激光谱线宽度为 0.22 nm 。

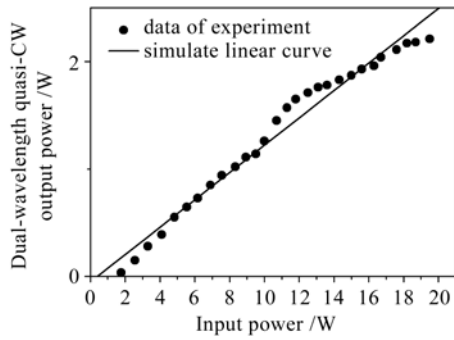


图 2 双波长输出功率与注入功率的关系
Fig. 2 Variation of dual-wavelength output power with input power

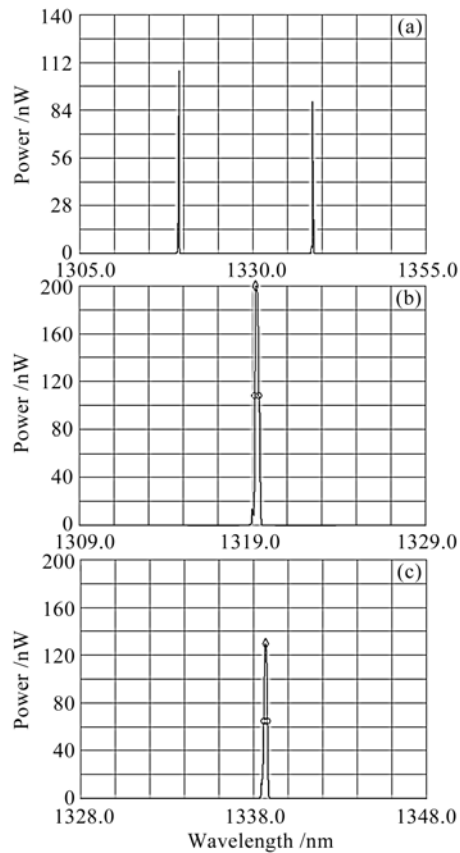


图 3 双波长准连续输出光谱
Fig. 3 Dual-wavelength quasi-CW output spectra
同时,对准连续输出功率的短期不稳定性进行了实验分析。图 4 给出了 20 min 之内的输出功率稳定性曲线。准连续输出功率的不稳定度为

$$\Delta P/\bar{P} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n-1}} \cdot \frac{1}{\bar{P}} \approx 0.487\%,$$

(n = 20)

式中 P_i 为每隔 1 min 读取的输出功率, n 为取点个数, \bar{P} 为 20 min 内的平均功率。实验结果表明输出功率非常稳定,不稳定性小于 0.487%。

在整个抽运功率的增加过程中,通过 Agilent 公司生产的光纤光谱仪对激光输出的光谱进行了监测,没有发现 1064 nm 激光振荡,说明 Nd:YAG 晶体和谐振腔镜的镀膜能够抑制掉 1064 nm 的激光振荡。图 5 给出激光器在 1000~1400 nm 的输出光谱图。

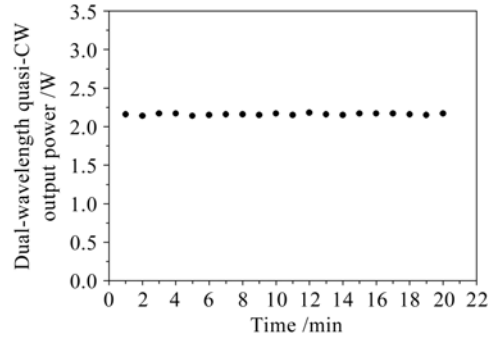


图 4 输出功率为 2.17 W 时的功率稳定性
Fig. 4 Stabilization of output power of 2.17 W

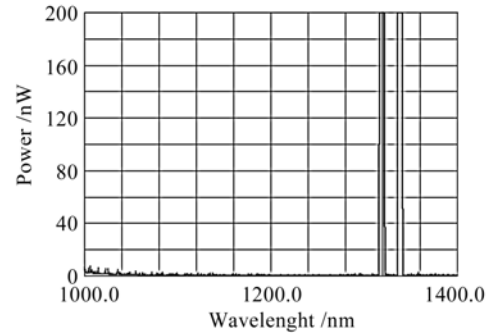


图 5 激光器在 1000~1400 nm 的输出光谱图
Fig. 5 Output spectrum of 1000~1400 nm

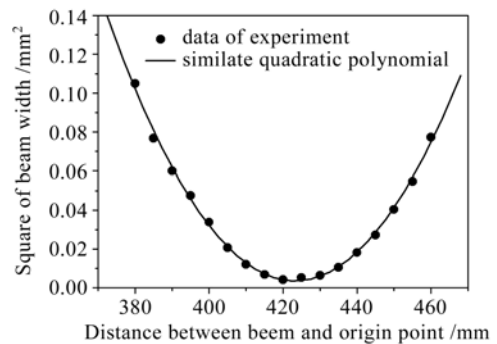


图 6 束宽平方与束宽位置到原点距离的关系图
Fig. 6 Square of beamwidth-distance between beam and origin point relationship

实验中,采用双曲线拟合法测量了双波长准连续偏振输出功率为 2.17 W 时的 M^2 因子,如图 6 所示。根据拟合曲线计算公式得出 M^2 因子为 1.165,束腰宽度 $\omega_0 = 67.86 \mu\text{m}$,束腰位置到原点的距离为 423 mm,发散角为 $7.27 \times 10^{-3} \text{ rad}$ (0.417°)。测量

结果表明双波长激光达到基模运转, 光束质量较好^[12,13]。

在声光 Q 开关重复频率为 50 kHz, 40 kHz, 30 kHz 时分别测量了双波长激光准连续输出功率和脉冲宽度。随着重复频率的降低, 输出功率略有降低, 脉冲宽度不断减少, 分别为 71.91 ns, 59.35 ns 和 46.99 ns, 如图 7 所示。

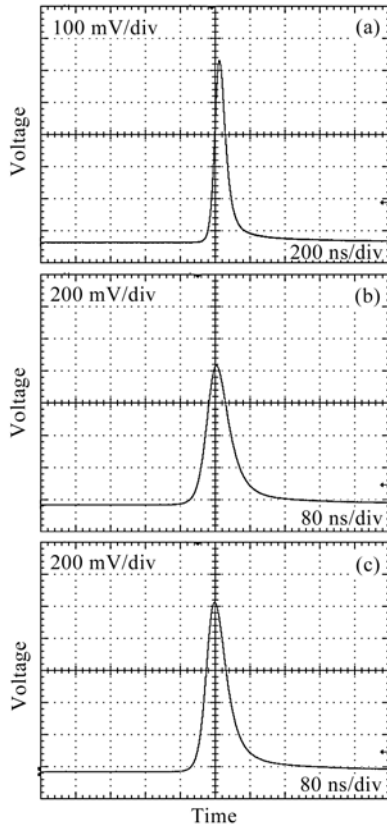


图 7 注入抽运功率 18.2 W 时, 在不同重复频率下双波长激光准连续输出脉冲图

Fig. 7 Output pulse figures of different repeat frequencies at input power of 18.2 W
(a) 50 kHz; (b) 40 kHz; (c) 30 kHz

3 理论计算

有机非线性晶体 DAST 因其低介电常数和强非线性成为高速调制器、混频和太赫兹辐射的产生和探测应用中极有潜力的晶体。已经有众多的研究小组利用光整流、差频等非线性机制在 DAST 晶体中实现了太赫兹辐射^[14~18]。

非线性差频过程的相位匹配需要满足能量守恒和动量守恒方程

$$\left| \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right| = \frac{1}{\lambda_3}, \quad (1)$$

$$\left| \frac{n_1}{\lambda_1} - \frac{n_2}{\lambda_2} \right| = \frac{n_3}{\lambda_3}, \quad (2)$$

差频输出的太赫兹功率为^[19]

$$P_3 = \frac{2\omega_3^2 d_{11}^2 L^2}{\epsilon_0 c^3 n_1 n_2 n_3} \left(\frac{P_1 P_2}{\pi r^2} \right) T_1 T_2 T_3 S, \quad (3)$$

式中

$$S = e^{-\alpha_3 L} \frac{1 + e^{-\Delta\alpha L} - 2e^{-\frac{1}{2}\Delta\alpha L} \cos(\Delta k L)}{(\Delta k L)^2 + \left(\frac{1}{2}\Delta\alpha L \right)^2},$$

$$T_i = \frac{4n_i}{(n_i + 1)^2}, \quad i = 1, 2, 3$$

$$\Delta k = k_1 - k_2 - k_3 = \frac{2\pi n_1}{\lambda_1} - \frac{2\pi n_2}{\lambda_2} - \frac{2\pi n_3}{\lambda_3},$$

$$\Delta\alpha = |\alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3|,$$

ω_3 为太赫兹波角频率, d_{11} 为有效非线性系数, L 为晶体长度, ϵ_0 为真空中介电常数, c 为光速, n_1 和 n_2 为 DAST 晶体对差频两波长 λ_1 和 λ_2 的折射率, n_3 为 DAST 晶体对太赫兹波 λ_3 的折射率。 P_1, P_2 分别为差频两波的峰值功率, r 为光斑半径, T_1, T_2 和 T_3 分别为 DAST 晶体对三波的透射系数。 α_1, α_2 和 α_3 分别为 DAST 晶体对 ω_1, ω_2 和 ω_3 的吸收系数。实验中采用 L 为 1 mm 的 DAST 晶体, 晶体对双波长的折射率分别为 $n_1 = 2.1544, n_2 = 2.1519$, 对 3.23 THz 波的折射率 n_3 为 2.2876。双波长输出峰值功率 P_1, P_2 差别不大, 可近似认为都是 298.5 W, 光斑半径 r 为 $5 \mu\text{m}$ 。DAST 晶体对 ω_1, ω_2 和 ω_3 的吸收系数 α_1, α_2 和 α_3 分别为 $0.5 \text{ cm}^{-1}, 0.5 \text{ cm}^{-1}, 82.48 \text{ cm}^{-1}$ 。采用普通 DAST 晶体, 理论计算可得输出功率为 0.324 mW。图 8 为理论计算输出功率随注入抽运功率的变化曲线。

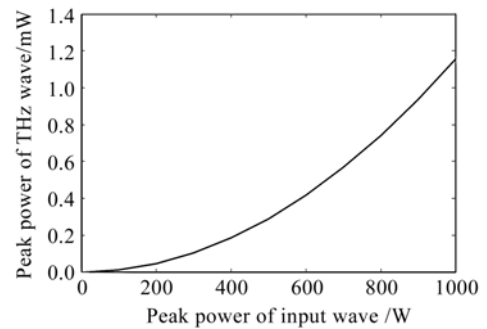


图 8 太赫兹波输出功率与注入光波功率的关系图
Fig. 8 Relationship between input power and output power

太赫兹输出功率与相位匹配、晶体吸收等因素有关, 所以存在使输出功率最大的最佳晶体长度。用 Matlab 软件得出如图 9 所示的太赫兹峰值功率

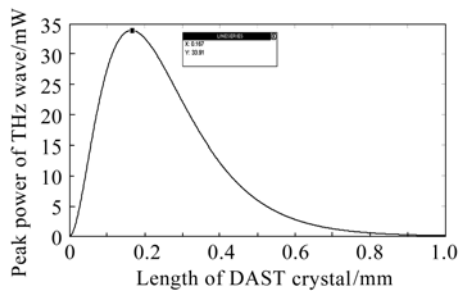


图9 太赫兹波输出功率与 DAST 晶体长度的关系
Fig. 9 Relationship between THz output power and crystal length

与晶体长度的关系,得出最佳晶体长度范围为0.163~0.167 mm,输出最大峰值功率33.91 mW。当晶体长度大于最佳长度,随着晶体长度的继续增大,输出功率锐减。

由于 DAST 晶体对太赫兹吸收系数很大,拟采用倾斜周期表面辐射输出结构提高输出功率。表面辐射因其有较大的辐射表面,太赫兹光束的发散角会很小。表面辐射结构中差频获得太赫兹波的转换效率要明显高于在块状晶体中采用共线结构的转换效率。DAST 晶体内波矢匹配如图 10 所示。差频两波 k_1 和 k_2 沿 y 方向传播,太赫兹波 k_3 沿 x 方向输出。 α 角为倾斜周期与 y 轴夹角, k_Λ 为空间倒格矢。 x 和 y 方向的相位失配量满足

$$\begin{cases} \Delta k_y = k_1 - k_2 - k_\Lambda \sin \alpha = \\ \frac{2\pi n_1}{\lambda_1} - \frac{2\pi n_2}{\lambda_2} - \frac{2\pi \sin \alpha}{\Lambda}, \\ \Delta k_x = k_3 - k_\Lambda \cos \alpha = \frac{2\pi n_3}{\lambda_3} - \frac{2\pi \cos \alpha}{\Lambda}, \end{cases} \quad (4)$$

式中 n_1, n_2, n_3 分别为 DAST 晶体对差频两波 k_1 和 k_2 及太赫兹波 k_3 的折射率。 Λ 为 DAST 晶体的倾斜周期。

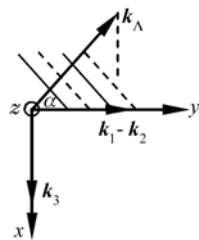


图10 DAST 晶体内波矢匹配图

Fig. 10 Wave vector matching in DAST

通过计算得到,利用 1318 nm 和 1338 nm 差频产生太赫兹波所用倾斜周期翻转 DAST 晶体的周期 Λ 约为 27.89 μm ,倾斜角度 α 约为 45.45°。采用这样的结构,并使差频两波紧靠晶体一侧,可使太赫兹

垂直晶体侧面高效输出。 k_1 和 k_2 的场分布为高斯型,如 $g_1(x) = \exp\left[-\frac{x^2}{a_1^2}\right]$, $g_2(x) = \exp\left[-\frac{x^2}{a_2^2}\right]$, 定义

$$G = \frac{|M|^2}{\int_{-\infty}^{\infty} g_1^2(x) dx \int_{-\infty}^{\infty} g_2^2(x) dx},$$

且不考虑晶体吸收,

$$P_3 = \frac{32d_{\text{eff}}^2 \gamma^2 LP_1 P_2}{\epsilon_0 n_1 n_2 n_3 c^3 a}, \quad (5)$$

理论上可以产生峰值功率为 12.44 mW 的太赫兹波输出。当考虑晶体吸收和 G 因子大小时,输出功率表达式中还包括晶体吸收部分

$$P_3 = \frac{32d_{\text{eff}}^2 \gamma^2 LP_1 P_2}{\epsilon_0 n_1 n_2 n_3 c^3 a} G e^{-\alpha}, \quad (6)$$

式中 γ 为电光系数,晶体长度 L 为 17.8 mm。假设光束与晶体侧面距离 l 为 100 μm ,晶体对 3.23 THz 的吸收系数约为 82.48 cm^{-1} ,则 $e^{-\alpha} = 0.44$ ^[20],光束半径为 5 μm ,则 $G = 0.86$,那么输出功率 P_3 为 4.71 mW。若光束半径为 10 μm ,则 $G = 0.53$,那么输出功率 P_3 为 2.9 mW。计算表明,采用表面辐射结构将大大提高输出功率,与设想一致。

4 结 论

实现了激光二极管端面抽运 Nd:YAG 1319 nm/1338 nm 双波长激光准连续偏振输出。理论计算表明利用这两条非常相近的谱线,通过差频晶体 DAST 实现两个波长差频,可以获得峰值功率为 4.71 mW 的高相干性太赫兹辐射。太赫兹辐射源的实验目前受限于高灵敏的探测器。下一步将利用 Bolometer 探测器进行双波长在 DAST 晶体中产生太赫兹辐射的实验。

参 考 文 献

- 1 Sun Bo, Yao Jianquan. Generation of terahertz wave based on optical methods [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10):1349~1359
孙 博,姚建铨. 基于光学方法的太赫兹辐射源[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10):1349~1359
- 2 Yuzo Sasaki, Avetisyan Yuri, Kodo Kawase *et al.*. Terahertz-wave surface-emitted difference frequency generation in slant-stripe-type periodically poled LiNbO₃ crystal [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(18):3323~3325
- 3 Yuzo Sasaki, Hiroyuki Yokoyama, Hiromasa Ito. Dual-wavelength optical-pulse source based on diode lasers for high-repetition-rate, narrow-bandwidth terahertz-wave generation [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(14):3066~3071
- 4 Shen Hongyuan. Dual wavelength crystal lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 1994, **A21**(5):334~340
沈鸿元. 双波长晶体激光器[J]. *中国激光*, 1994, **A21**(5):334~340

- 5 Li Haifeng, Zhou Rui, Zhao Pu *et al.*. 1386 nm continuous wave output from laser diode end-pumped 1386 nm Nd:YVO₄ laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7):1069~1072
李海峰,周睿,赵璞等. 激光二极管端面抽运 Nd:YVO₄ 实现1386 nm连续波激光输出[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7):1069~1072
- 6 Wei Yong, Zhang Ge, Huang Chenghui *et al.*. 1318.8 nm/1338 nm simultaneous dual wavelength Nd:YAG laser [J]. *Laser & Infrared*, 2005, **35**(3):164~166
魏勇,张戈,黄呈辉等. 1318.8 nm/1338 nm 同时振荡双波长 Nd:YAG 激光器[J]. *激光与红外*, 2005, **35**(3):164~166
- 7 Rui Zhou, Wuqi Wen, Zhiqiang Cai *et al.*. Efficient stable simultaneous CW dual-wavelength diode-end-pumped Nd:YAG laser operating at 1.319 and 1.338 μm [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(10):597~599
- 8 H. Y. Shen, R. R. Zeng, Y. P. Zhou *et al.*. Comparison of simultaneous multiple wavelength lasing in various neodymium host crystals at transitions from $^4F_{3/2} - ^4I_{11/2}$ and $^4F_{3/2} - ^4I_{13/2}$ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(20):1937~1938
- 9 H. Y. Shen, H. Su. Operating conditions of continuous wave simultaneous dual wavelength laser in neodymium host crystals [J]. *J. Appl. Phys.*, 1999, **86**(12):6647~6651
- 10 Zhang Qiang, Yao Jianquan, Wen Wuqi *et al.*. High power laser diode pumped Nd:YAG continuous wave dual-wavelength laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5):577~581
张强,姚建铨,温伍麒等. 高功率激光二极管抽运 Nd:YAG 连续双波长激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5):577~581
- 11 Ardhendu Saha, Aniruddha Ray, Sourabh Mukhopadhyay *et al.*. Simultaneous multi-wavelength oscillation of Nd laser around 1.3 μm : A potential source for coherent terahertz generation [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(11):4721~4726
- 12 Sun Jinhai, Zhao Guozhong, Zhang Liangliang *et al.*. Effect of applied electrical and magnetic field on THz radiation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2):192~195
孙金海,赵国忠,张亮亮等. 外加电场和磁场对太赫兹辐射产生的影响[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2):192~195
- 13 Sun Hongqi, Zhao Guozhong, Tian Yan *et al.*. Transverse mode distribution of wave by THz imaging technology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1225~1229
孙红起,赵国忠,田艳等. 太赫兹波传播过程中横模分布的成像[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9):1225~1229
- 14 Kodo Kawase, Takaaki Hatanaka, Hidenori Takahashi *et al.*. Tunable terahertz-wave generation from DAST crystal by dual signal-wave parametric oscillation of periodically poled lithium niobate [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(23):1714~1716
- 15 T. Taniuchi, J. Shikata, H. Ito. Tunable terahertz-wave generation in DAST crystal with dual-wavelength KTP optical parametric oscillator [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(16):1414~1416
- 16 Arno Schneider, Ivan Biaggio, Peter Gunter. Optimized generation of THz pulses via optical rectification in the organic salt DAST [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **224**:337~341
- 17 T. Taniuchi, S. Okada, H. Nakanishi. Widely-tunable THz-wave generation in 2~20 THz range from DAST crystal by nonlinear difference frequency mixing [J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(1):60~62
- 18 P. E. Powers, R. A. Alkuwari, J. W. Haus. Terahertz generation with tandem seeded optical parametric generators [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(6):640~642
- 19 Shen Yuanrang. Nonlinear Infrared Generation [M]. Beijing: Science Press, 1977. 29~48
沈元壤. 红外辐射的产生——利用非线性光学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1977. 29~48
- 20 M. Schall, H. Helm, S. R. Keiding. Far infrared properties of electro-optic crystals measured by THz time-domain spectroscopy [J]. *Int. J. Infrared and Millimeter Waves*, 1999, **20**(4):595~604