

文章编号: 2095-4980(2016)02-0163-05

CO₂ 激光差频产生太赫兹波的理论计算及分析

赵 刚, 彭续金, 杨 闯, 蔡 和, 刘亚萍, 黄俊峰

(西南技术物理研究所 激光技术部, 四川 成都 610041)

摘 要: 为进一步发挥 CO₂ 激光差频产生太赫兹(THz)辐射的潜力, 通过计算 GaAs, ZnGeP₂ 和 GaSe 晶体差频的相位匹配参数, 结合晶体光学参数和损伤阈值比较 3 种晶体的差频性能和各自优势, 分析相位失配和晶体吸收对差频转换效率的影响, 得到 3 种晶体差频产生 THz 辐射各自的调谐范围、差频效率和实验操作等特征, 表明选择低吸收系数晶体的重要性。

关键词: 太赫兹波; CO₂ 激光差频; 相位匹配; 晶体吸收

中图分类号: TN124

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201602.0163

Computation and analysis of terahertz wave difference frequency generation based on CO₂ laser

ZHAO Gang, PENG Xujin, YANG Chuang, CAI He, LIU Yaping, HUANG Junfeng

(Department of Laser Technology, Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu Sichuan 610041, China)

Abstract: In order to make the best of CO₂ laser difference frequency for terahertz(THz) generation, characteristics of three kinds of nonlinear crystals are studied. Firstly, the phase matching parameters of GaAs, ZnGeP₂ and GaSe are computed, performances and advantages of each crystal are compared by combining with optical parameters and damage threshold. And then, influencing factors such as phase-mismatching and crystal absorption on efficiency of THz generation are analyzed. Tunable range, efficiency and experimental operating characteristics of THz radiation generated by three kinds of crystals are gained. All the results show that it's critical to choose crystal with low absorption coefficient.

Key words: THz wave; CO₂ laser difference frequency; phase matching; crystal absorption

在生物医学、光谱和成像以及远距离探测等太赫兹(THz)应用技术中, 特别缺乏高峰值功率相干可调谐 THz 波源^[1-2]。激光差频产生 THz 辐射, 调谐简单, 光路易调, 能输出高峰值功率相干辐射^[3]。横向激励大气压(Transversely Excited Atmospheric-pressure, TEA)CO₂ 激光峰值功率高, 窄线宽, 多谱线易调谐, 是差频产生 THz 辐射的良好光源。国内已有利用 CO₂ 激光在砷化镓(GaAs)晶体中差频产生 THz 辐射的研究^[4], 但优化参数以进一步提高 THz 辐射功率值得探索, 同时针对不同 THz 应用波段选择恰当晶体能更充分发挥 TEA CO₂ 激光潜力。下面计算 3 种晶体用于 CO₂ 激光差频的相位匹配参数, 比较 3 种晶体差频性能和各自优势, 分析影响差频转换效率的因素, 为 CO₂ 激光差频产生 THz 辐射的设计和实验给出参考。

1 相位匹配参数计算

激光差频产生 THz 辐射的转换效率一般很低, 为 10⁻⁵ 量级, 适用小信号近似理论分析, 在不考虑晶体吸收, 入射光波为平面波条件下, 得到激光差频的 THz 辐射功率为^[5]:

$$P_3 = \frac{2\mu_0}{c} \frac{d_{\text{eff}}^2 \omega_3^2}{n_1 n_2 n_3} \frac{P_1 P_2}{S} L^2 \sin^2 \left(\frac{\Delta k L}{2} \right) \quad (1)$$

式中: μ_0 为自由空间磁导率; c 为真空光速; P_1, P_2 分别为角频率 ω_1, ω_2 的入射 CO₂ 激光功率; ω_3 为产生的 THz 辐射的角频率, 且有 $\omega_3 = \omega_1 - \omega_2$; d_{eff} 为有效非线性光学系数; n_1, n_2 和 n_3 为三频率光在非线性晶体中的折射率; L 为相互长度; S 为三波相互作用面积; $\Delta k = |\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_3|$ 为相位失配量。

收稿日期: 2014-10-28; 修回日期: 2015-12-16

下面计算基于 CO_2 激光差频的 ZnGeP_2 , GaAs 和 GaSe 晶体的相位匹配参数。典型的 TEA CO_2 激光器输出能量支线如图 1 所示^[6], 由图可见, 通过 CO_2 激光差频能够产生数十微米到毫米的 THz 辐射, 覆盖几乎整个 THz 波段。3 种晶体色散曲线及吸收系数^[3]如图 2 所示, 可见 3 种晶体在 THz 波段都具有较低的吸收系数, 而色散特性不同, 决定了相位匹配方式和参数特征不同。

GaAs 晶体采用非共线相位匹配方式差频, ZnGeP_2 晶体采用 eo-o 和 eo-e 2 种 II 类共线相位匹配方式差频, GaSe 晶体采用 oe-o 和 oe-e 2 种 II 类共线相位匹配方式差频。把波长 2 固定为 $10.59 \mu\text{m}$, 按图 3 所示相位匹配方式, 计算得 3 种晶体的相位匹配参数如图 4 所示。差频过程往往难以精确相位匹配, 单轴晶体中非寻常光还存在走离角, 这些因素都会对差频效率产生重要影响, 需加以考虑。

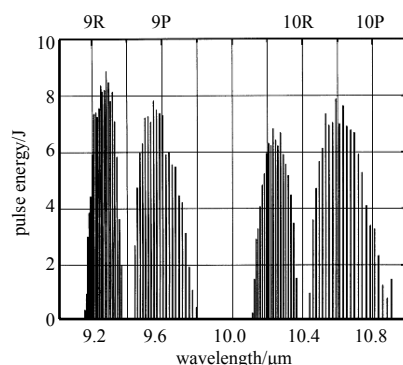
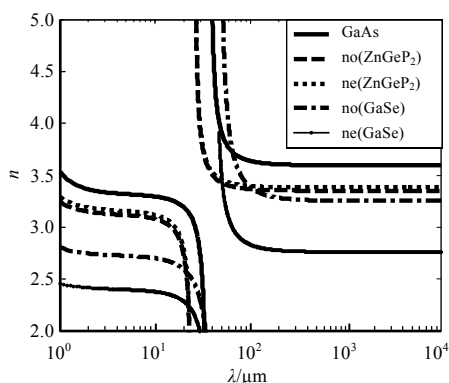
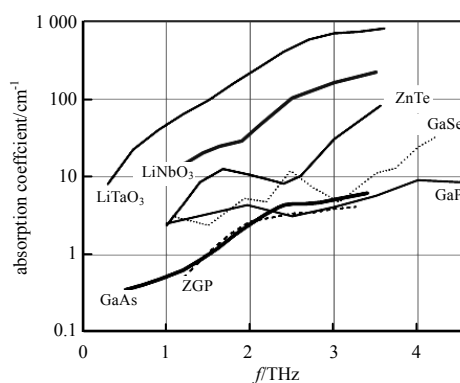


Fig.1 Branch lines of TEA CO_2 laser
图 1 TEA CO_2 激光器能量支线图



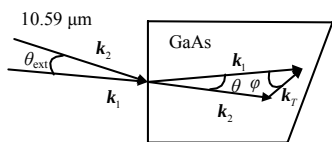
(a) dispersion curves



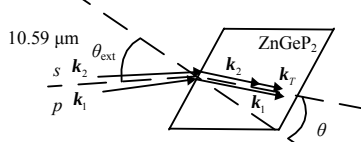
(b) absorption coefficients

Fig.2 Dispersion curves and absorption coefficients of three kinds of crystals

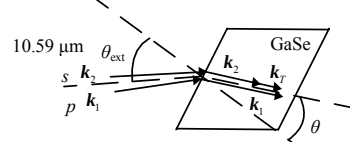
图 2 3 种晶体的色散曲线及吸收系数图



(a) GaAs



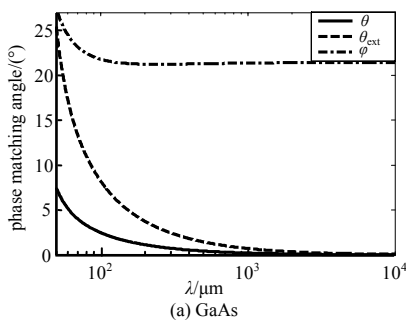
(b) ZnGeP_2



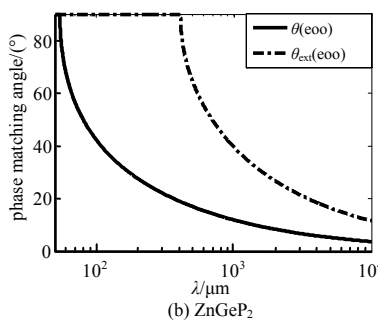
(c) GaSe

Fig.3 Phase matching ways of three kinds of crystals for THz by difference frequency generation

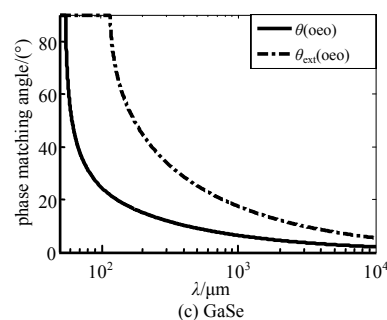
图 3 3 种晶体差频产生 THz 辐射的相位匹配方式



(a) GaAs



(b) ZnGeP_2



(c) GaSe

Fig.4 Phase matching angle curves of three kinds of crystals for THz by difference frequency generation

图 4 3 种晶体差频产生 THz 辐射的相位匹配角曲线

2 3 种晶体差频性能比较

从色散曲线及相位匹配参数上比较, GaAs 晶体折射率最大, 相位匹配角很小, 相位失配允许角小于 0.1° , 要求光路调整精确度高, 同时 THz 波出射角约 22° , 大于全反射角, 因此需要将出射面进行切割, 泵浦光和 THz 辐射间存在较大夹角, 有利于将泵浦光和 THz 辐射分离。 ZnGeP_2 晶体双折射小, 相位匹配角大, 在产生波长小

于 400 μm 的 THz 波时,入射角超过了 90° ,需要切割入射面,但同时相位失配允许角也大,走离角小,利于实验操作。GaSe 晶体折射率小,双折射大,相位匹配角和失配角都小,走离角大;而 GaSe 晶体由于其机械特性不能进行切割,因此产生的 THz 波长限制在 160 μm 以上。

从晶体光学参数和损伤阈值方面比较, GaAs 有效非线性光学系数为 50 pm/V^[4],损伤阈值取 25 MW/cm²^[7]; ZnGeP₂ 的 d_{36} 约 72 pm/V^[8],损伤阈值 60 MW/cm²^[8]; GaSe 的 d_{22} 为 54 pm/V^[8],损伤阈值 30 MW/cm²^[8]。图 5 是 3 种晶体差频的 $d_{\text{eff}}^2/n_1n_2n_3$ 项和 $d_{\text{eff}}^2I_{\text{th}}^2/n_1n_2n_3$ 项比较图。相同泵浦功率密度下, GaSe 晶体在整个 THz 波段都具有高而均匀的差频效率,而 ZnGeP₂ 晶体在短波段的差频效率最高。考虑晶体阈值,由于 ZnGeP₂ 晶体阈值最大,在短波段具有产生最大 THz 辐射输出的潜力。GaAs 晶体虽然效率不佳,但大尺寸 GaAs 晶体生长技术成熟,便于集成,相干长度长,利于准相位匹配和波导形式,具有独特潜力。

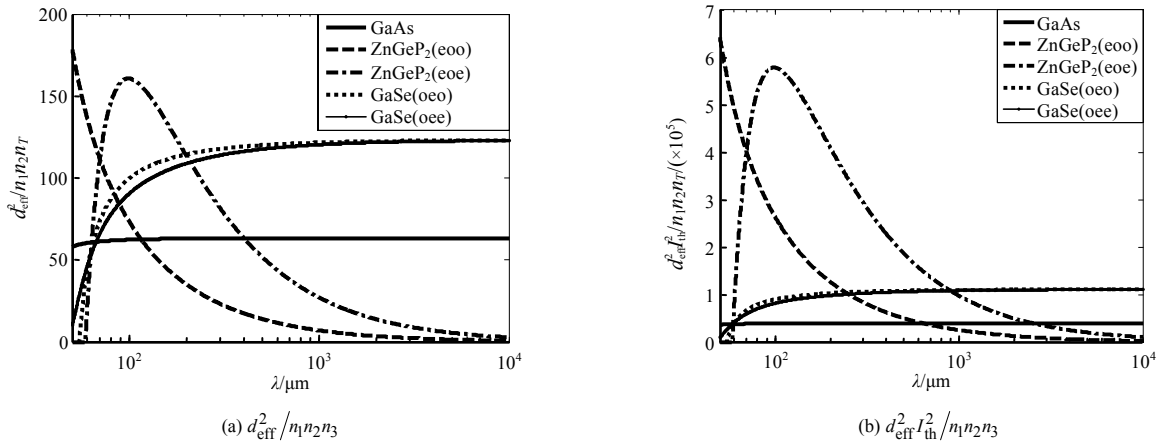


Fig.5 Comparison of difference frequency performance of three kinds of crystals

图 5 3 种晶体差频性能比较图

3 差频转换效率的影响因素分析

下面以 CO₂ 激光在 GaSe 晶体中差频产生 319.3 μm 的 THz 辐射为例,分析相位失配和晶体吸收对差频转换效率的影响。设晶体对三波光强的吸收系数分别为 α_1, α_2 和 α_3 , 得到差频产生的 THz 辐射功率为^[5]:

$$P_3 = \frac{2\mu_0}{c} \frac{d_{\text{eff}}^2 \omega_3^2}{n_1 n_2 n_3} \frac{P_1 P_2}{S} F \quad (2)$$

式中 $F = L^2 e^{-\alpha_3 L} \frac{1 + e^{-\Delta\alpha L} - 2e^{-\frac{1}{2}\Delta\alpha L} \cos(\Delta k L)}{\left(\frac{1}{2}\Delta\alpha L\right)^2 + (\Delta k L)^2}$ ($\Delta\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_3$) 为吸收失配因子,表示由晶体吸收和相位失配共同决定的 THz 辐射功率的衰减因子,当无相位失配且 $\Delta\alpha = 0$ 时,该因子最大为 L_2 。

3.1 相位失配的影响

不考虑晶体吸收,只考虑 $\Delta k \neq 0$ 情形,则 $P_3 = \frac{2\mu_0}{c} \frac{d_{\text{eff}}^2 \omega_3^2}{n_1 n_2 n_3} \frac{P_1 P_2}{S} K$, 其中 $K = L^2 \sin^2 c^2 \left(\frac{\Delta k L}{2} \right)$ 为相位失配因子,表示由相位失配决定的 THz 辐射功率的衰减因子。在 $L = \frac{\pi}{\Delta k}$ 处,输出功率最大为 $P_{3,\text{max}} = \frac{2\mu_0}{c} \frac{d_{\text{eff}}^2 \omega_3^2}{n_1 n_2 n_3} \frac{P_1 P_2}{S} \frac{4}{\Delta k^2}$ 。 Δk 与晶体内两泵浦光的夹角 $\Delta\theta$ 成正比,计算得不同失配角下相位失配因子 K 与晶体长度关系如图 6 所示,表明产生的 THz 辐射功率随相互作用长度先增加后减小,相位失配角越大,最佳长度越短,最大 THz 辐射功率越小。因此在实验中应尽量控制好合束精确度。

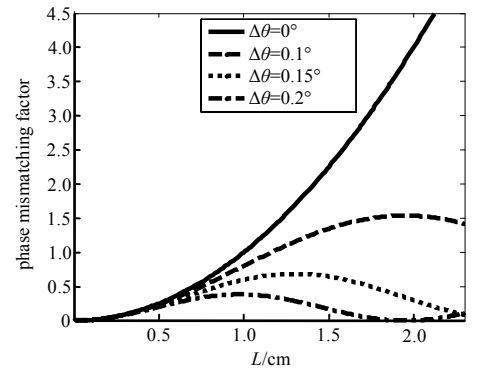


Fig.6 Phase mismatching factor with interaction length
图 6 相位失配因子与相互作用长度关系曲线

3.2 晶体吸收的影响

不考虑相位失配, 只考虑晶体吸收, $\Delta\alpha \neq 0$, 则 $P_3 = \frac{2\mu_0 d_{\text{eff}}^2 \omega_3^2 P_1 P_2}{c n_1 n_2 n_3 S} A$, $A = 4e^{-\alpha_3 L} \frac{(1 - e^{-\frac{\Delta\alpha}{2} L})^2}{\Delta\alpha^2}$ 为吸收因子, 表示由吸收决定的 THz 辐射功率的衰减因子。在 $L = -\frac{2}{\Delta\alpha} \ln \frac{\alpha_3}{\alpha_1 + \alpha_2}$ 处, 输出功率最大为 $P_{3,\text{max}} = \frac{2\mu_0 d_{\text{eff}}^2 \omega_3^2 P_1 P_2}{c n_1 n_2 n_3 S} \frac{4}{(\alpha_1 + \alpha_2)^2} \left(\frac{\alpha_3}{\alpha_1 + \alpha_2} \right)^{2\alpha_3/\Delta\alpha}$ 。GaSe 晶体对 CO₂ 激光吸收系数约为 1 cm^{-1} , 在不同 THz 波吸收系数情况下, 吸收因子 A 与晶体长度关系如图 7 所示。该图表明, 吸收系数越小, 相应最佳晶体长度越长, THz 辐射功率越大, 超过最佳相互作用长度后, 功率逐渐减小。

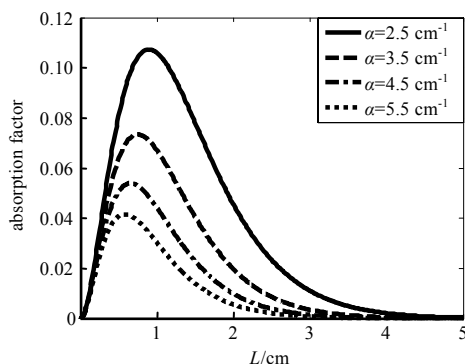


Fig.7 Absorption factor with interaction length
图 7 吸收因子与相互作用长度关系曲线

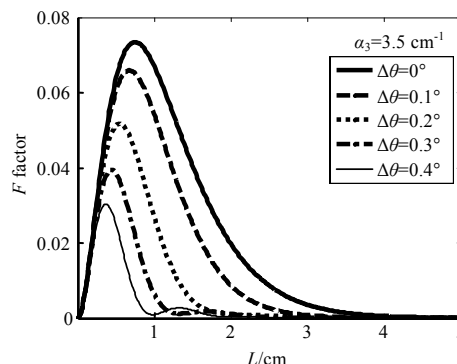


Fig.8 F factor with interaction length
图 8 吸收失配因子 F 与相互作用长度关系曲线

3.3 吸收和相位失配共同影响

GaSe 晶体对 $319.3 \mu\text{m}$ THz 波吸收系数取 3.5 cm^{-1} , 得到吸收失配因子 F 与相互作用长度关系如图 8 所示。该图表明, 吸收对差频效率的影响比相位失配明显的多, 在存在明显吸收情况下, 相位失配角大小可以放宽, 最佳晶体长度主要由吸收系数决定, 选择吸收系数小的晶体非常关键。

3 种晶体都存在最佳相互作用长度, 原因是 CO₂ 激光刚进入晶体时 THz 功率增益最大, 随着长度增加, CO₂ 激光功率逐渐被晶体吸收, THz 功率增益因此降低。当超过一定长度即最佳相互作用长度, THz 功率增益小于晶体对 THz 辐射的吸收, THz 辐射功率开始降低, 最终趋于 0。

4 结论

对 3 种晶体用于 CO₂ 激光差频进行了参数计算、性能比较和影响因素分析, 结果表明, 不同晶体调谐范围、差频效率和实验操作等方面各不相同, 选择低吸收系数非线性晶体特别重要, 这为 CO₂ 激光差频产生 THz 辐射的设计和实验提供了参考。

参考文献:

- [1] 冯华, 李飞, 陈图南. 太赫兹波生物医学研究的现状与未来[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(6): 827-835. (FENG Hua, LI Fei, CHEN Tunan. Current situation and future trends for THz-biomedicine[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(6): 827-835.)
- [2] 刘丰, 朱忠博, 崔万照, 等. 太赫兹技术在空间领域应用的探讨[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(6): 857-866. (LIU Feng, ZHU Zhongbo, CUI Wanzhao, et al. Application of terahertz techniques in space science[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(6): 857-866.)
- [3] VODOPYANOV K L. Optical THz-wave generation with periodically-inverted GaAs[J]. Laser & Photonics Review, 2008, 2(1/2): 11-25.
- [4] LU Y, WANG X, MIAO L, et al. Efficient and widely step-tunable terahertz generation with a dual-wavelength CO₂ laser[J]. Applied Physics B, 2011(103): 387-390.

(下转第 170 页)