

文章编号 : 0253-2239(2002)03-0294-04

小型可调谐 TEA CO₂ 激光的二次谐波产生*

黄金哲 胡孝勇 曲彦臣 任德明 刘逢梅

(哈尔滨工业大学光电子研究所, 哈尔滨 150001)

程干超

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘要: 利用国产的、尺寸为 7 mm×8 mm×12 mm 的 AgGaSe₂ 晶体, 实现了可调谐 TEA CO₂ 激光的二次谐波产生, 得到了 CO₂ 激光 10.6 μm 和 9.6 μm 谱带的 12 条谱线的二次谐波。最大的二次谐波输出能量达到 1.32 mJ [10P(16)谱线]。在 10P(18)谱线处获得的最大能量转换效率为 4%。

关键词: 二次谐波产生; AgGaSe₂ 晶体; TEA CO₂ 激光

中图分类号: O437.1 文献标识码: A

1 引 言

CO₂ 激光器是一种应用最广泛的中红外量子发生器。就其最重要的激光输出参数——功率、单色性、束散角和稳定性等方面而言, 它优于其它中红外激光器; 此外, 它具有能量效率高、可靠性好、以及设计成熟和运行简单等优点。尽管它可以在 9 μm~11 μm 范围内调谐, 但人们还是希望扩展它的谱线范围, 以满足更广阔的应用需要。特别是近年来, 随着 3 μm~5 μm 大气窗口热成像系统的开发和利用, 国际上正在大力开展 3 μm~5 μm 激光光源的研究。众所周知, 迄今在这一波段尚没有直接振荡的小型且操作简便的高功率激光器, 所以人们致力于利用波长变换技术来获得这一波段相干光源的开发研究。其中, 最引人注目的是利用非线性晶体产生 CO₂ 激光的二次谐波的研究, 这在国外已经得到很好的发展^[1~6]。除去上述 CO₂ 激光的优点之外, TEA CO₂ 激光器可制成小型高重复频率的高功率激光器。本文将报道利用 AgGaSe₂ 非线性光学晶体产生 TEA CO₂ 激光的二次谐波的研究。

2 理论分析与计算

当忽略晶体中二次谐波发生过程中基波的衰减

与吸收时, 二次谐波输出的功率密度及相关参数可以表示为^[7]:

转换效率:

$$\eta = \frac{I_2}{I_1} = \frac{8\pi^2 L^2 d_{\text{eff}}^2}{n_1^2 n_2 \lambda_1^2 \epsilon_0 c} I_1 \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta k L}{2}\right), \quad (1)$$

匹配角:

$$\text{sinc}(\theta_m) = \frac{n_{2c}}{n_{1o}} \left(\frac{n_{2o}^2 - n_{1o}^2}{n_{2o}^2 - n_{2c}^2} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

可接受角:

$$\Delta\theta = \frac{\pi/L}{(\omega/c) n_{1o}^3 (n_{2c}^{-2} - n_{2o}^{-2}) \text{sinc}(2\theta_m)}. \quad (3)$$

以上公式中, ϵ_0 为真空介电常数, L 为晶体长度, λ 为光的波长, n 为折射率(对于色散介质, 与光的频率或波长有关), 角标 o, e 则表示寻常光与非寻常光, 而以 1, 2 表示基波光与倍频光; I_1, I_2 分别表示基波光与倍频光的光强(以实函数表示), d_{eff} 为有效非线性光学常数, 波矢差是 $\Delta k = 2k_1 - k_2$ 。后面的计算所用到的参数 $n(\lambda), d_{36}$ 取自文献^[7, 8]。由(1)式可知, 增大 L 和 $|I_1|$ 都可以提高二次谐波输出。但由于长的非线性晶体难于制造且价格昂贵, 所以增加长度的方法受到限制。增大基波光强 $|I_1|$ 则需要将基波光聚焦后入射到晶体中。但对红外非线性晶体, 通常都必须考虑其损伤阈值, AgGaSe₂ 晶体当然也不例外。当基波光的功率密度太高时晶体会受到损伤, 所以也并非基波光的光强越大越好, 而是存在一个适当的值。为此, 我们计算了 TEM₀₀ 模式的基波光的光斑半径随聚焦镜焦距

* 国家自然科学基金(69878005)资助课题。

E-mail: nbehjz@263.net

收稿日期: 2001-03-02

的变化关系。由高斯光束 q 参数变换的基本知识^[9] 可以得到焦距公式：

$$f = \pi \omega_0 \omega / \lambda (\lambda \ll \omega_0, \omega). \quad (4)$$

以凹面反射镜为例，式中 f 为反射镜焦距， ω_0 为入射光束束腰半径， ω 为出射光在焦点处（晶体中）的光斑半径。这样可按照上式选取适当的反射镜的曲率半径来满足实验的要求，用以提高二次谐波的输出能量而又不损伤晶体。在本研究中入射到晶体中的基波光束为 TEM₀₀ 模式，令激光脉冲波形近似地满足高斯分布，则光强可以写为（以实函数表示）

$$I(t, r, \omega, \tau) = I_0 \exp \left[-\frac{r^2}{\omega^2} - \left(\frac{t - t_0}{\tau} \right)^2 4 \ln 2 \right], \quad (5)$$

式中 I_0 为 t_0 时刻的光强，即峰值功率密度， τ 为脉宽， ω 为焦点处光斑半径。由(5)式可得到脉冲的峰值功率密度：

$$I_0(E, \omega, \tau) = \frac{2 \sqrt{\ln 2 / \pi} \cdot E}{\pi \tau \omega^2}, \quad (6)$$

E 为脉冲能量。将(4)式中 ω 代入(6)式中，可得

$$I_0(E, f, \omega_0, \lambda) = \frac{2 \omega_0^2 E \sqrt{\pi \ln 2}}{\tau f^2 \lambda^2}. \quad (7)$$

当入射光波长为 10.59 μm，其束腰半径 $\omega_0 \approx 2$ mm 时，计算得到了 E 分别为 0.15 J、0.10 J、0.05 J 时的峰值功率密度随 f 的变化曲线，如图 1 所示。由图可见，为了不损伤晶体，又能获得较高的二次谐波输出，反射镜焦距应大于 400 mm 较为合适。因为当峰值功率密度超过 40 MW/cm² 时，晶体将被损伤。由于实际的激光脉冲波形有约占总能量 40% 的拖尾，实际的功率密度按这一比例减少，可以将脉冲能量控制在阈值以内。实验中选用了曲率半径为 1 m（焦距为 0.5 m）的镀金凹面反射镜。

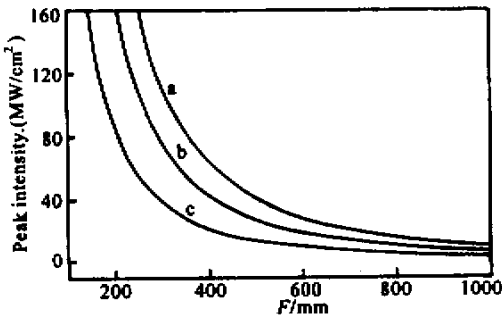


Fig. 1 The peak intensity represented by the function $I_0(E, f, \omega_0, \lambda)$ with the parameters E (a: $E=0.150$ J, b: $E=0.100$ J, c: $E=0.050$ J) and $\omega_0=8$ mm, $\tau=50$ ns, $\lambda=10.59$ μm

3 实验研究

实验中，利用中科院安徽光机所生产的 7 mm × 8 mm × 12 mm 的 AgGaSe₂ 晶体作为倍频晶体。首先研究了 10.59 μm 波长谱线 10P(20) TEA CO₂ 激光的二次谐波发生。实验装置如图 2 所示。

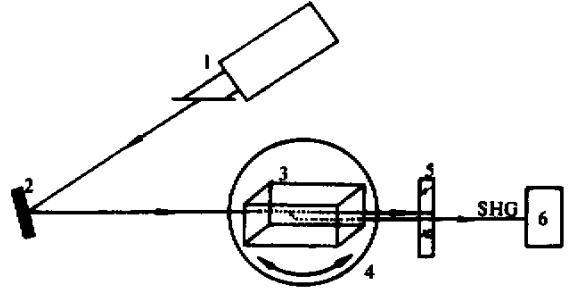


Fig. 2 Experimental setup for SHG in TEA CO₂ laser with AgGaSe₂ crystal. 1: TEA CO₂ laser; 2: mirror; 3: AgGaSe₂ crystal; 4: rotary stage; 5: filter; 6: energy detector

我们以 0.5° 角为外部角度间隔，以 ED-500 能量计测量基波光能量，用 2835-c 型能量计探测倍频光能量。在入射基波能量约为 80 mJ 的情况下，测量了抽运光外部入射角与倍频光输出能量的关系。如图 3 所示。

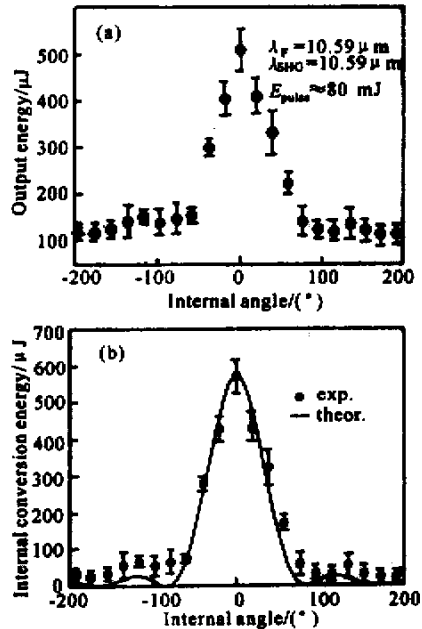


Fig. 3 Angle tuning curves of SHG at the wavelength 10.59 μm in 10P(20) line. (a) Indicates the detected output energy. (b) The internal conversion energy comparative with formula $E \text{sinc}^2(\Delta k l / 2)$

由图 3 得到的匹配角与可接受角同在理论上计

算的结果比较吻合。图 3(a)为能量计探测所得数据。将实测数据适当进行处理,略去基频光的影响(约 100 μJ),算出了晶体内部的转换能量[图 3(b)],在图 3(b)的理论曲线中, E 的选取为匹配处的平均倍频脉冲能量。

对应于图 3 得出

$$\text{匹配角: } \theta_m = 55^\circ \pm 0.5^\circ, \quad (8)$$

$$\text{可接受角: } \Delta\theta \approx 0.8^\circ. \quad (9)$$

同时,我们在最佳的匹配位置,还用单色仪和 3 μm ~ 5 μm 的 HgCdTe 探测器测量了倍频光的波长,得到结果为:

$$\lambda_2 = (5.294 \pm 0.003) \mu\text{m}. \quad (10)$$

此外,利用可输出 50 余条谱线的可调谐 TEA CO₂ 激光器进行了调谐实验研究^[10],使用 LiF 衰减片(总的基波光的透射率为 $T = 4 \times 10^{-5}$,总的倍频光的透射率为 81%),通过改变基波光的入射角度,得到了各支谱线中(10P, 10R, 9P, 9R)具有代表性的 12 条谱线的倍频光输出。图 4 给出了调谐曲线图,并画出了理论曲线。

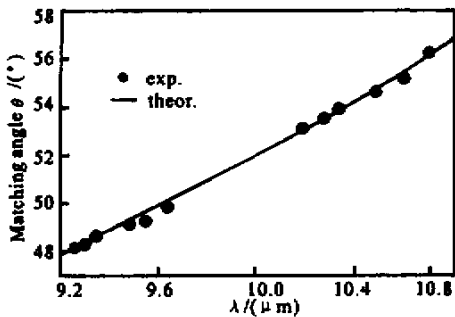


Fig.4 The measured data of matching angles vs varied wavelengths and the tuning curve represented by the function $\theta_m(\omega)$ of formula (2)

在图 4 所引用的理论公式(2)中,我们将晶体的切割角 $\theta = 55^\circ$ 情况下提高了 0.2° ,这样才与实验数据符合得较好,这一点可能是由晶体的切割误差和晶体中杂质造成折射率微弱偏离的综合因素形成的。另外,通过增大抽运光能量,在 10P(16)处获得了最大内部转换能量 1.32 mJ。

此外,在 10P(18)处改变激光器的输出能量,并将晶体中心放在焦点上,测量了倍频光的能量。由测量数据得到抽运光在晶体内的脉冲能量转换效率为 2.4%,主脉冲的最大转换效率为 4%(主脉冲能量占整个脉冲的 60%)。

在实验中,选取了激光器的四个输出能量值,并作多次测量。选择适当的参数($d_{36} = 33 \text{ pm/V}$),作出理论曲线作为比较,得到图 5。对 4 个所选能量

的位置,每个位置观测 50 个脉冲。在入射能量约为 52 mJ(功率密度约为 25 MW/cm^2)时,40 个脉冲以后明显地观测到了晶体的表面损伤,因此在图中后两个数据点的值明显偏小,这是由损伤所引起的效率降低所致。

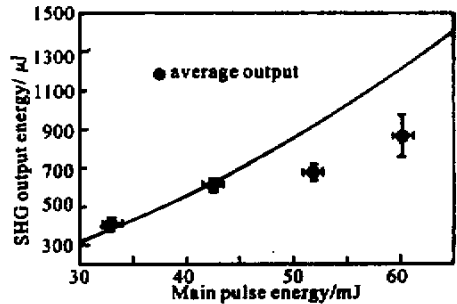


Fig.5 The SHG output energy vs main pulse energy and theoretically fitting energy conversion

讨论 以上是利用 AgGaSe₂ 晶体进行二次谐波产生的初步实验。实验证明 AgGaSe₂ 晶体具有良好的倍频特性:大的非线性光学常数 $d_{36} \approx 33 \text{ pm/V}$,较大的损伤阈值(大于 20 MW/cm^2)。利用 TEA CO₂ 激光器能够快调谐的优点,可以实现快速倍频调谐。在提高转换效率和转换能量方面,我们期望可以通过改善脉冲波形(去掉低能量的尾部)和光束质量来解决。

在实验过程中,硕士生常志文等人在仪器使用过程中给予了许多帮助。周波同学给了我们许多有益的建议。在这里表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Byer R L, Choy M M, Herbst R L *et al.*. Second harmonic generation and infrared mixing in AgGaSe₂. *Appl. Phys. Lett.*, 1974, **24**(2): 65~68
- [2] Eckardt R C, Fan Y X, Byer R L *et al.*. Efficient second harmonic generation of 10- μm radiation in AgGaSe₂. *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **47**(8): 786~788
- [3] Russell D A, Ebert R. Efficient generation and heterodyne detection of 4.75- μm light with second-harmonic generation. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(33): 6638~6644
- [4] Sakuma J, Itoh T, Harasaki A *et al.*. Development of a high power mid-IR source using TEA CO₂ laser MOPA system with AgGaSe₂ crystal. *The Review of Laser Engineering*(*レーザー研究*), 1997, **25**(1): 61~66 (in Japanese)
- [5] Schunemann P G, Schepler K L, Budni P A. Nonlinear frequency conversion performance of AgGaSe₂, ZnGeP₂, and CdGeAs₂. *MRS Bulletin*, 1998, **23**(7): 45~49
- [6] Gorobets V A, Petukhov V O, Tochitskii S Y *et al.*.

Studies of nonlinear optical characteristics of IR crystals for frequency conversion of TEA CO₂ laser radiation. *Optiko-Mekhanicheskaya Promyshlennost*, 1999, **66**(1): 62~67

[7] Fan Qikang, Wu Cunkai, Mao Shaoqing. *Nonlinear Optics*(非线性光学). Nanjing: Jiangsu Publisher of Science and Technology, 1988. 7~81(in Chinese)

[8] Tanaka E, Kato K. Thermo-optic dispersion formula of AgGaSe₂ and its practical applications. *Appl. Opt.*,

1998, **37**(3) :561~564

[9] Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Jiahua. *Laser Principles*(激光原理). Beijing: National Defense Industry Press, 1984. 98~104

[10] Qu Yanchen, Hu Xiaoyong, Liu Fengmei *et al.*. Rapidly tuning miniature TEA CO₂ laser rotating mirror and grating mechanism. *Infrared Physics & Technology*, 2000, **41**(3):143~147

Second Harmonic Generation in Tunable Mini-TEA CO₂ Laser

Huang Jinzhe Hu Xiaoyong Qu Yanchen Ren Deming Liu Fengmei
(*Opto-Electronic Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001*)

Cheng Ganchao

(*Anhui Institute of Optical and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031*)

(Received 2 March 2001)

Abstract : Second harmonic generation (SHG) is experimentally demonstrated in tunable mini-TEA CO₂ laser with home made AgGaSe₂ crystal, which has the dimension 7 mm × 8 mm × 12 mm. 12 SH lines generated from CO₂ spectrum region 10.6 μm~9.6 μm were obtained. The maximum SH output was found to be 1.32 mJ [10P(16)]. And, in 10P(18) line, the maximum energy conversion was 4%.

Key words : second harmonic generation ; AgGaSe₂ crystal ; TEACO₂ laser