

KTP 和 BBO 晶体对 $1.06 \mu\text{m}$ 皮秒光脉冲的倍频效率*

吴 逢 铁

(华侨大学电气技术系, 泉州 362011)

摘要 用5 mm 的 KTP(KTiOPO_4)和 BBO($\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$)非线性晶体,对皮秒的 CPM,Nd:YAG 脉冲激光的腔外倍频效应进行研究,获得倍频能量转换效率分别为 42%和 32%,证明 KTP 倍频效率高于 BBO,结果与理论分析相符.

关键词 非线性光学晶体,皮秒,二次谐波, KTP 和 BBO 晶体

分类号 O 734.1

高功率 $0.53 \mu\text{m}$ 绿光,是激光远程测距,激光跟踪,水下探测,泵浦染料激光器和喇曼激光器^[1]十分有用的相干光源,因而得到非常广泛的研究.但是,对 Nd:YAG 激光的倍频研究大多集中在毫微秒或更长的时域里^[2],较少涉及皮秒和更短光脉冲的研究,而 $0.53 \mu\text{m}$ 的皮秒相干光对研究材料超快弛豫过程却是必不可少的手段.本文以 KTiOPO_4 和 $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ 非线性晶体(简称 KTP, BBO 晶体)作为倍频元件,对带抗共振环(ARR)的对撞脉冲锁模(CPM) Nd:YAG 皮秒激光脉冲进行腔外倍频研究.当晶体为 KTP,获得能量转换效率为42%的二次谐波光,而用 BBO 晶体则获得倍频能量转换效率为32%.

1 光倍频的理论基础

光在非线性介质中传播服从麦克斯韦方程

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}), \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}. \quad (2)$$

我们研究的强光效应其引起介质的极化,包括线性和非线性极化两部分,即

$$\mathbf{P} = \epsilon \chi_L \mathbf{E} + \mathbf{P}_{NL}. \quad (3)$$

若只考虑二次谐波效应,非线性极化和光强有如下关系

$$(\mathbf{P}_{NL})_i = \sum_{jk} 2 d_{ijk} E_j E_k, \quad (4)$$

* 本文 1993-10-18 收到;福建省自然科学基金资助项目

其中 d_{ijk} 为三阶极化张量, 当相互作用的三列平面波为

$$E_i^{(\omega_i)}(z, t) = \frac{1}{2} (E_i(z) e^{i(\omega_i t - k_i z)} + \text{C. C.}). \quad (5)$$

式中 C. C. 表示复数共轭项, $i=1, 2, 3$, 对方程(1)~(5)进行矢量变换运算, 并利用光场缓变恢复近似, 可以得到三波非线性耦合的基本方程^[3]

$$\left. \begin{aligned} \frac{dE_1}{dz} &= -\frac{\sigma_1}{2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_1}} E_1 - i\omega_1 \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_1}} d_e E_3 E_2^* e^{-i(k_3 - k_2 - k_1)z}, \\ \frac{dE_2}{dz} &= -\frac{\sigma_2}{2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_2}} E_2^* + i\omega_2 \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_2}} d_e E_1 E_3^* e^{-i(k_1 - k_3 - k_2)z}, \\ \frac{dE_3}{dz} &= -\frac{\sigma_3}{2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_3}} E_3 - i\omega_3 \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_3}} d_e E_1 E_2 e^{-i(k_1 - k_2 - k_3)z}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

方程组(6)为倍频、和频、差频、参量振荡和放大的理论基础. 式中, $E_i (i=1, 2, 3)$ 为 3 个不同频率 ω_i 的平面波, k_i 为三波的波矢, σ_i 为介质的电导率, ϵ_i 为介质的介电常数, d_e 为有效非线性系数且其与三阶极化张量 d_{ijk} 有 $d_e = l_{ia} l_{j\beta} l_{k\gamma} d_{ijk} (l_{ia}, l_{j\beta}, l_{k\gamma}$ 为方向余弦). 在强光作用下, 当 $d_e \neq 0$ 频率为 ω_2 和 ω_3 的光波电场 E_2 和 E_3 , 均会对频率为 ω_1 的光波电场 E_1 有影响. 这表明不同频率的光在介质中传播时, 可以互相影响和转化, 并通过非线性系数 d_e 达到相互耦合. 当频率 $\omega_1 = \omega_2 = \omega$, $\omega_3 = 2\omega$ 时, 这就是我们要讨论的倍频效应. 其中 ω 和 2ω 分别为基波和二次谐波频率.

考虑倒空效应, 倍频转换效率可表达为^[4]

$$\eta_{\text{SHG}} = P_{2\omega}/P_{\omega} = \tanh^2(l\omega d_e (2P_{\omega}/A\epsilon_0 n_{2\omega}^2 C^3)^{1/2}), \quad (7)$$

式中 P_{ω} , $P_{2\omega}$ 分别为基波和二次谐波光功率, ω 为基波光的角频率, l 为非线性晶体的倍频长度, d_e 为有效非线性系数, ϵ_0 为真空介电常数, n_{ω} 和 $n_{2\omega}$ 分别为晶体对基波光和倍频光的折光率, A 为光束面积. 由式(7)可知, 在满足晶体相位匹配条件下, 对于对一定长度 l 的晶体, 寻求大的有效非线性系数 d_e 和提高泵浦光功率密度, 可有效提高倍频光转换效率. 此外, 理论上指出长的倍频晶体, 可获得较高的倍频光转换. 然而进一步的分析可知, 在给定的实验条件下, 晶体存在一个特征长度 $l_s = 2/d_e A_1(0)$, 其中 $A_1(0) = (n_{2\omega}/2\omega)^{1/2} E_{\omega}(0)$. 当 $l > l_s$ 时, 基频光和倍频光分别趋于零和饱和, 故存在一个最佳晶体长度 l_s 可获得最佳倍频转换效率.

2 KTP 和 BBO 晶体的倍频特性

2.1 KTP 晶体的选择和倍频特性

KTP 晶体是目前国际上公认的最理想的全能型倍频材料. 它属于双轴晶体, 具有非线性系数大(约为 KDP 的 15 倍), 光损伤阈值高(对 40 ps, $\lambda=1.06 \mu\text{m}$ 的脉冲串, $P_{\text{th}}=30 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$), 透光波段宽(0.35~0.45 μm), 不潮解和化学稳定性好等优点. 若对 1.06 μm 光波进行倍频, 晶体的最佳匹配为 I 类相位匹配, 其匹配角 $\theta=90^\circ$, $\varphi=21.3^\circ$. 在此条件下计算出^[5]: KTP 晶体倍频的接收角很大, $\Delta\theta_{\text{max}}(^{\circ})=-7\sim 7.2$, $\Delta\varphi_{\text{max}}(^{\circ})=-7.8\sim 11$ (当 KTP 晶体长 3.7 mm), 走离角很小, 仅 0.262° . 实验中, KTP 晶体采用 I 类相位匹配, 切割方式为 $\theta=90^\circ$, $\varphi=21^\circ$, 尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$.

2.2 BBO 晶体的选择和倍频特性

BBO 晶体是 80 年代发展起来的一种新型非线性晶体^[6], 格外引人注目. 它的有效倍频系数约为 KDP 的 6 倍(对 $\lambda=1.06\text{ }\mu\text{m}$), 光损伤阈值高(对 20 ps, $\lambda=0.6943\text{ }\mu\text{m}$, 能量 $E=10\text{ mJ}$ 的脉冲, $P_{th}=10\text{ GW}\cdot\text{cm}^{-1}$), 透光波段为 $0.19\sim3.5\text{ }\mu\text{m}$. 用 BBO 晶体对 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 进行倍频, 若采用 I 型匹配方式, 根据折射率的色散方程, 有

$$\left. \begin{aligned} n_o^2 &= 1.9595 + 0.7892\lambda^2/(\lambda^2 - 0.02163), \\ n_e^2 &= 1.6932 + 0.6782\lambda^2/(\lambda^2 - 0.01816). \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

可求得匹配角 $\theta=21.57^\circ$. 实验中, BBO 晶体采用 I 类相位匹配, 匹配角 $\theta=22^\circ$, 尺寸为 $5\text{ mm}\times6\text{ mm}\times6\text{ mm}$, 倍频长度为 5 mm .

3 实验结果与理论分析

下面给出实验装置图(附图), 其参数同文[7]. 带 ARR 结构的 CPM 非稳腔 Nd:YAG 激光器, 输出脉宽为 10 ps 和能量几十毫焦的 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 超短光脉冲串. 激光采用透射耦合输出, 可提高输出能量和光束质量. 输出镜 M_2 对 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 光的透射和反射比为 50:50. 我们分别进行了 KTP 和 BBO 对微微秒光脉冲的腔外倍频实验, 把晶体分别置于附图中 A 处, $0.53\text{ }\mu\text{m}$ 绿光经滤光片 M_1 除去 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 及其它杂光, 并由能量计测定其大小 $E_{2\omega}$. 然后, 在没有晶体存在的情况下, 测定基波能量 E_ω , 即可算出倍频转换效率. 但是, KTP 和 BBO 晶体通光面未镀增透膜而存在反射损耗, 需由公式

$$\eta_{\#} = (0.95)^{-2} E_{2\omega}/E_\omega \tag{9}$$

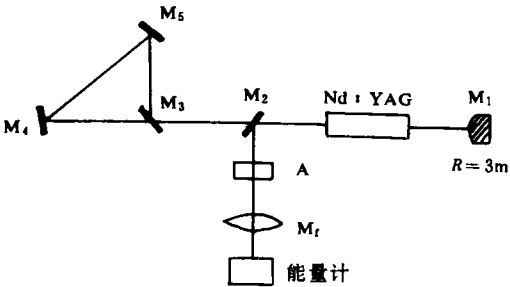
进行修正, 式中系数表示扣除不镀膜晶体表面的菲涅耳反射损耗, 因为这种反射损耗可通过在晶体表面镀增透膜来消除. 实验结果如附表, 其中每个数据均为 10 次测定值的平均数.

附表 KTP 和 BBO 晶体倍频效率

晶体种类	$l\times b\times h/(\text{mm}\cdot\text{mm}\cdot\text{mm})$	E_ω/mJ	$E_{2\omega}/\text{mJ}$	$\eta_{\text{SHG}}/(\%)$	$\eta_{\#}/(\%)$
KTP	$5\times5\times5$	26.4	10.0	38	42
BBO	$5\times6\times6$	27.4	8.0	29	32

实验结果指出: 对于相同长度(5 mm)的 KTP 和 BBO 晶体, KTP 对 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 来秒光脉冲的位频能量转换效率高于 BBO 晶体.

KTP 晶体的有效非线性系数 d_e 明显大于 BBO 晶体($d_e^{\text{KTP}}\approx2.5d_e^{\text{BBO}}$), 而 KTP 晶体的折光率($n_\omega=1.75$, $n_{2\omega}=1.78$) 仅略大于 BBO 晶体的折光率($n_\omega=1.65$, $n_{2\omega}=1.67$), $(\frac{1}{n_\omega n_{2\omega}})^{1/2}_{\text{KTP}}=0.91(\frac{1}{n_\omega n_{2\omega}})^{1/2}_{\text{BBO}}$. 在基本相同的基波泵浦功率密度 P_ω/A 作用下, 对于相同的倍频晶体长度,



附图 倍频实验装置图

可由倍频转换效率公式(7),算出 KTP 的倍频转换效率 $\eta_{\text{SHG}}^{\text{KTP}}$ 大于 BBO 的倍频转换效率 $\eta_{\text{SHG}}^{\text{BBO}}$. 理论分析同实验结果相符.

4 结论

采用 KTP 和 BBO 非线性晶体作为倍频元件,在带 ARR 结构的 CPM 非稳腔 Nd:YAG 激光器中进行腔外倍频实验. 当晶体长度为 5 mm 时,获得 KTP 和 BBO 倍频能量转换效率分别为 42% 和 32%. 实验结果证明 KTP 晶体倍频效率高于 BBO 晶体,这同理论分析相符. 此外,由于 KTP 晶体不潮解,倍频时晶体有很大的接收角而容易调节. 因此,我们认为:对 1.06 μm 皮秒脉冲激光器可选用 KTP 晶体进行腔外倍频以获得高能量、高转换效率的倍频绿光输出.

参 考 文 献

- 1 吴逢铁,蒲继雄,张文珍. 皮秒激光瞬态受激喇曼散射的实验研究. 光学学报, 1993, 13(11):967~970
- 2 Ou Z Y, Pereira S F, Polzik E S, et al. 85% efficiency for cw frequency doubling from 1.08 to 1.06 μm . Opt. Lett., 1992, 17(9):640~642
- 3 Yariv A. Quantum electronics 3rd. New York: John Wiley & Sons., 1989. 392~398
- 4 郭晶华,赵庆春,陆雨田等. KNbO₃ 和 KTP 晶体对微微秒 YAG 激光的倍频效率的比较. 光学学报, 1991, 11(3):224~229
- 5 Yao J Q, Fahlen T S. Calculation of optimum phase match parameters for the biaxial crystal KTiOPO₄. J. Appl. phys., 1984, 55(1):65~68
- 6 陈创天,吴柏昌,江爱栋等. 新型紫外倍频晶体 $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ 的光学性能和生长. 中国科学(B 辑),1984, (7):598~604
- 7 张文珍,吴逢铁,蒲继雄. BBO 晶体在 CPM 非稳腔 Nd:YAG 激光器的腔内倍频效应. 光学学报,1993, 13(5):431~434

Frequency Doubling Efficiency of Crystals KTP and BBO on 1.06 μm Picosecond Light Pulse

Wu Fengtie

(Dept. of Electric Technique, Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract The extracavity second harmonic generation (SHG) of nonlinear crystals KTP and BBO on picosecond CPM, Nd:YAG pulsed laser are studied experimentally. For a KTP or BBO crystal with a length of 5 mm, a 42% or 32% efficiency of frequency-doubled energy conversion can be obtained respectively. The frequency doubling efficiency of KTP is demonstrated experimentally to be higher than that of BBO, a result coinciding with that from theoretical analysis.

Keywords non-linear optic crystals, picosecond, second harmonic generation, KTP and BBO crystals