

BBO 晶体光学参量发生器

李 港 郝海林

(应用物理系) (北京市微技术研究所)

【摘要】通过对 BBO 晶体中光学参量发生器的理论分析，并且利用 YAG 锁模激光器的 2、3、4 次谐波泵浦光参量发生器，得到了 BBO 晶体中各物理量对光学参量发生器的阈值，转换效率和线宽影响的实验结果，参量光转换效率超过 30%。

关键词：光学参量发生器，BBO 晶体，转换效率

早期光学参量效应方面的研究着重于光学参量振荡器(OPO)，近年来随着超短脉冲技术的发展，光学参量发生器(OPG)以其没有谐振腔的特点得到了迅速的发展^[1~3]。目前人们在光学参量发生器后再加一级光学参量放大器的条件下，已经取得了参量转换效率超过 50% 的出色成果^[4]。80 年代诞生的新型非线性光学晶体 $\beta\text{-B}_2\text{O}_3$ (BBO)，具有透明范围宽，损伤阈值高，非线性系数大等优点^[5]。本文利用中国科学院福建物质结构研究所生产的 BBO 晶体，用 YAG 锁模激光的 2 倍频、3 倍频、4 倍频光作为泵浦源，进行了光学参量发生器方面的研究。

1 理论分析

由非线性光学理论可知，光学参量效应可由非线性振幅耦合波动方程描述。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial A_s}{\partial z} &= i\sigma_s A_i^* A_p e^{i\Delta kz} \\ \frac{\partial A_i}{\partial z} &= i\sigma_i A_s^* A_p e^{i\Delta kz} \\ \frac{\partial A_p}{\partial z} &= i\sigma_p A_s^* A_i e^{-i\Delta kz} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

(1) 式中的脚标 p, s, i 分别表示泵浦光、信号光和闲频光； $A_j (j=s, i, p)$ 为复振幅； $\sigma_j = \frac{\omega_j}{cn_j} \chi_e (j=s, i, p)$ 为耦合系数， χ_e 为有效非线性系数；相位失配因子 $\Delta k = k_p - k_s - k_i$ ， $k_j (j=s, i, p)$ 为波矢； z 方向为晶体中光波的传播方向。令

$$\left. \begin{aligned} A_s &= \rho_s e^{-i\phi_s} \\ A_i &= \rho_i e^{-i\phi_i} \\ A_p &= \rho_p e^{-i\phi_p} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 $\rho_j (j=s, i, p)$ 为实振幅， $\phi_j (j=s, i, p)$ 为相位角。将(2)式代入(1)式，令方程两边实部与虚部分别相等，并引入一组归一化变量^[6]，则有

$$\left. \begin{aligned}
 u_s &= \left(\frac{\varepsilon_0 \lambda_s n_s}{\pi w} \right)^{\frac{1}{2}} \rho_s = \left(\frac{I_s}{\omega_s w} \right)^{\frac{1}{2}} \\
 u_i &= \left(\frac{\varepsilon_0 \lambda_i n_i}{\pi w} \right)^{\frac{1}{2}} \rho_i = \left(\frac{I_i}{\omega_i w} \right)^{\frac{1}{2}} \\
 u_p &= \left(\frac{\varepsilon_0 \lambda_p n_p}{\pi w} \right)^{\frac{1}{2}} \rho_p = \left(\frac{I_p}{\omega_p w} \right)^{\frac{1}{2}} \\
 \xi &= \frac{2\pi \chi_e (\pi w)^{\frac{1}{2}} z}{(\varepsilon_0 \lambda_s \lambda_i \lambda_p n_s n_i n_p)^{\frac{1}{2}}} \\
 \Delta s &= \frac{\Delta k z}{\xi} \\
 w &= I_s(o) + I_i(o) + I_p(o) \\
 I_j &= 2\varepsilon_0 c n_j \rho_j^2 \quad (j=s, i, p) \\
 \theta &= \Delta k z + \Phi_s + \Phi_i - \Phi_p
 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 u_j ($j=s, i, p$) 为归一化光子流; ξ 为归一化长度; w 为 3 个光波的总光强, 忽略光损耗, 则光在晶体中传播时, w 是个恒量; I_j 为光强, $I_j(o)$ 为初始光强 ($j=s, i, p$); θ 为相对相位角. 则 (1) 式可变为^[6]

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{d u_s}{d \xi} &= -u_i u_p \sin \theta \\
 \frac{d u_i}{d \xi} &= -u_s u_p \sin \theta \\
 \frac{d u_p}{d \xi} &= u_s u_i \sin \theta \\
 \frac{d \theta}{d \xi} &= \Delta S + \left(\frac{u_s u_i}{u_p} - \frac{u_i u_p}{u_s} - \frac{u_s u_p}{u_i} \right) \cos \theta
 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

(4) 式为归一化耦合波方程组. 以 BBO 晶体为例, 对 (4) 式进行数值解, 结果见图 1 ~ 图 3.

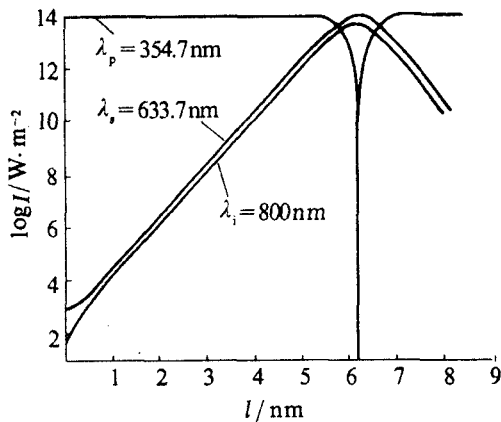


图 1 参量晶体中各光波光强 I 随晶体长度 l 的变化

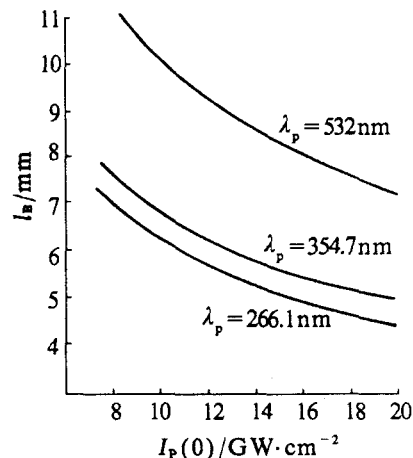


图 2 最佳晶体长度 l_B 与泵浦光强 $I_p(o)$ 的关系

图 1 给出了 354.7nm 波长光泵浦时, BBO 晶体中泵浦光、信号光、闲频光的光强变化情况. 初始时信号光与闲频光从噪声水平上发展起来, 随着在晶体中的传播而逐渐增大, 直至

泵浦光倒空, 参量光的光强和转换效率都增长为极大值, 此时对应的晶体长度称为最佳晶体长度 l_b ; 泵浦光倒空后, 开始了参量的逆过程(和频过程), 能量由参量光向泵浦光转换, 使得信号光和闲频光的光强下降.

最佳晶体长度 l_b 与泵浦光的光强 $I_p(0)$ 、波长 λ_p 有关. 图 2 表明了, 在光参量发生器中, 最佳晶体长度近似与泵浦光强的平方根成反比. 就是说, 为了得到高的转换效率, 若泵浦光较强时, 所需要的晶体长度 l_b 短一些; 若泵浦光较弱时, 所需要的 l_b 就长些.

图 3 给出最佳晶体长度 l_b 与泵浦光波长 λ_p 的关系. 在相同的泵浦光强下, 为了得到高的参量转换效率, 泵浦光 λ_p 越短, 所需要的晶体 l_b 也越短; 就是说, 短波长光的泵浦效率较高.

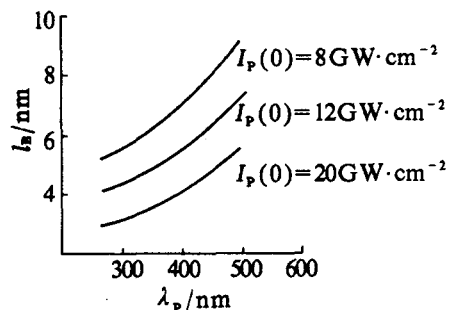
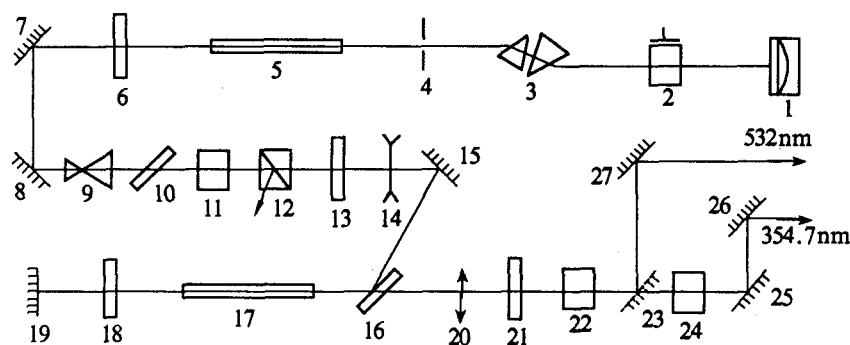


图 3 最佳晶体长度 l_b 随泵浦光波长 λ_p 的变化

2 泵浦源

本实验所用的泵浦源为美国 Quantel 公司生产的 501-C10 型主被动锁模 YAG 激光器, 其光路图如图 4 所示.



1. 染料盒及全反镜 2. 声光调制器 3. 棱镜 4. 小孔光栏 5.17. YAG 棒 6. 输出镜
7.8.15.19. 全反镜 9. 扩束镜 10.16. 偏振片 11. 潘克尔盒 12. 格兰棱镜 13.21. 1/2波片
14. 负透镜 18. 1/4 波片 20. 正透片 22. 2倍频晶体 24. 3倍频晶体 23.25.26.27. 滤波片

图 4 501-C10 型激光器光路示意图

501-C10 型主被动锁模 YAG 激光器的技术指标为: 锁模脉宽 35ps, 1064nm 波长激光的单脉冲能量为 75mJ, 532nm 波长激光的单脉冲能量为 30mJ, 354.7nm 波长激光的单脉冲能量为 10mJ. 若将 532nm 激光再倍频, 可获得大于 6mJ 的 266nm 激光. 经过适当的缩束或聚焦, 使 532nm、354.7nm、266nm 3 种波长激光的光强均能达到或超过 20 GW/cm^2 , 以此做为光学参量发生器的泵浦光源.

3 实验结果

3.1 参量光环

当泵浦光强达到几 GW/cm^2 时, 由光学参量发生器(BBO 晶体)可产生彩色的参量光环, 其大小及光频率随泵浦光的发散角和晶体的入射角而变化. 图5(见彩色插页)是晶体沿同一方向转动, 不同入射角时的参量彩色圆环. 不同的频率成份在总参量光中所占的比例, 随晶体入射角的变化而有规律地变化, 并且重复性很好. 随着泵浦光发散角的逐渐增大, 彩色圆环的宽度逐渐变窄, 最后形成一个窄的彩色圆环(见彩色插页图6). 当晶体的入射角变化时, 这个窄彩色环中不同颜色的光也有规律地变化.

3.2 阈值

将在实验时刚刚能观察到微弱参量光时的泵浦强度定义为参量发生的阈值强度. 图7和图8分别给出了BBO晶体中参量光的阈值光强随晶体长度和泵浦光波长的变化. 从这两个图中可以看出, 参量晶体越长, 泵浦光波长越短, 阈值光强就越低.

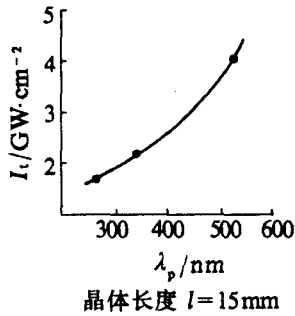


图7 阈值光强 I_t 随泵浦光波长 λ_p 的变化

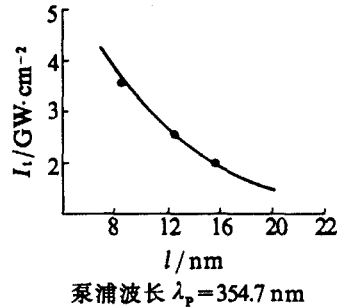


图8 阈值光强 I_t 随晶体长 l 的变化

3.3 转换效率

这里将转换效率定义为参量光的输出能量与泵浦能量之比, 即讨论的是能量转换效率, 从图9可以看出, 晶体越长, 转换效率 η 随泵浦光强 I_p 的增长越迅速. 当泵浦光强达到 $14\text{GW}/\text{cm}^2$ 时, 长为 15mm 晶体的转换效率可以高达 36% . 在图10中, 由于晶体加工的原因, 正入射对应的是紫光, 晶体偏转最大时为红光, 而红光增益大, 紫光增益小, 因此转换效率出现一个极值. 图11表明, 泵浦光波长越短, 转换效率越高.

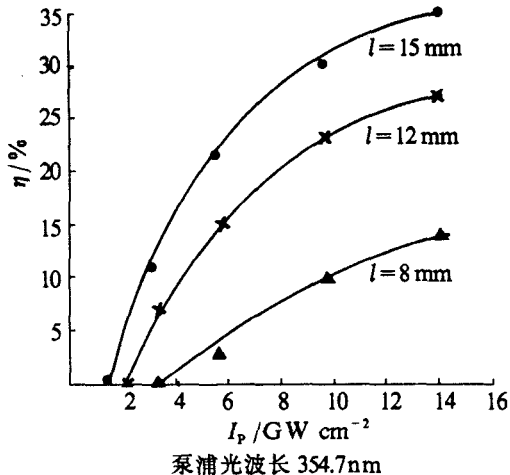


图9 参量转换率 η 随泵浦光强的变化

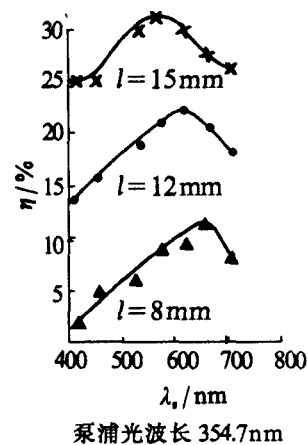


图10 参量转换效率 η 随参量光波长 λ_s 的变化

3.4 线宽

对于光学参量发生器,引起光线宽展宽的主要原因有以下4个方面^[7]:(1)参量光的高增益;(2)泵散光的发散角;(3)泵浦光的线宽;(4)偏轴参量的发生.一般情况下,参量光高增益对光线宽展宽的影响最大,泵浦光发散角和线宽的影响次之,偏轴参量发生对光线宽的影响最小;但对于BBO晶体则不然,BBO晶体的色散大、接收角小,偏轴参量发生对光线宽的影响相当大,加上其它3方面的因素,使得BBO晶体光参量发生器出射的参量光线宽非常宽.

压缩参量光线宽的一个有效的方法就是增加一块晶体,进行参量放大.由于第二块晶体相位匹配条件的限制,使得由第二块晶体出射的参量放大光的线宽可以大大被压缩.

经过参量放大后的光线宽随泵浦光强和参量光波长的变化见图12和图13所示.在光参量放大中,由高增益引起的光线宽展宽是主要因素,故参量光的光线宽随泵浦光强的增长而急剧增长.要得到较窄光线宽,应减小泵浦光强.参量放大光的光线宽随参量波长的变化略有起伏,考虑到实验条件及其它因素的影响,可近似认为参量光线宽不随参量光波长变化.在实验中还发现,参量放大光的光线宽与两晶体的间隔有关:两晶体相距越远,光线宽越窄,但同时转换效率下降;两晶体相距越近,光线宽越宽,同时转换效率增加.

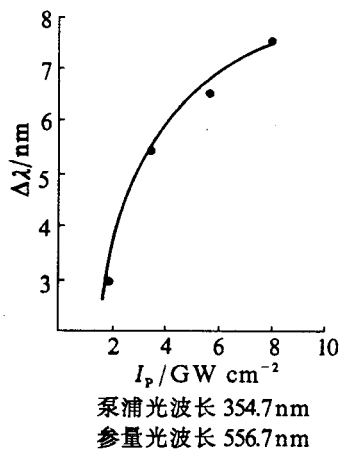


图12 参量光线宽 $\Delta\lambda$ 随泵浦光强 I_p 的变化

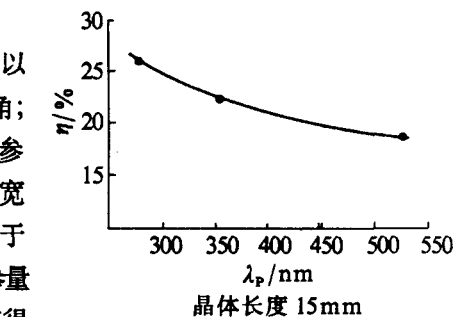


图11 参量转换效率 η 随泵浦光波长 λ_p 的变化
晶体长度 15mm

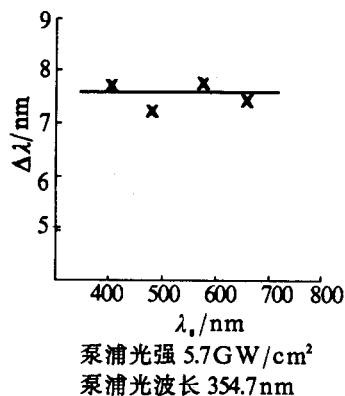


图13 参量光线宽 $\Delta\lambda$ 随参量光波长 λ_s 的变化

参 考 文 献

- 1 Kryukov P Sov J Quant Electro. , 1977, 7(1): 127
- 2 Sailmeier A. Appl Phys, 1980, 23: 113
- 3 Anthon D W, Nathel H, Guthals D M, et al. Apple Phys, 1987, 58(11): 2054
- 4 Kabelka V, Kutka A, Piskarskcs A, et al. Sov J Quant Electro, 1979, 9(8): 1088
- 5 陈创天, 吴柏昌, 江爱栋等. 中国科学 B 辑, 1984, 28(7): 598
- 6 Baumgertener R A and Byer R L. IEEE J Quant Electro, 1979, QE-15(6): 432
- 7 Seilmeier A. Opt Commum, 1978, 24(3): 237

BBO Crystal Optical Parametric Generator

Li Gang

(Department of Applied Physics)

Hao Hailin

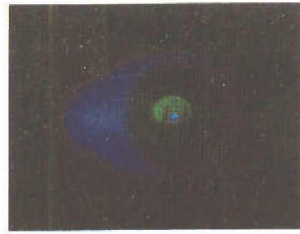
(Beijing Institute of Tiny Technology)

【Abstract】 The theory of optical parametric generator in BBO crystal is analysed and optical parametric generator is Pumped by the second, third and fourth harmonic of YAG mode-locking laser. The following experimental results are obtained such as the influence of the physical parameters on the threshold, the conversion efficiency (over 30%) and the bandwidth of optical parametric generator in BBO crystal.

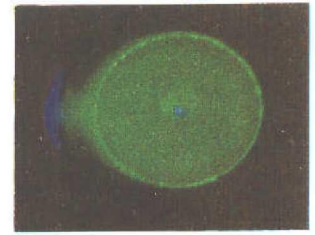
Key Words: optical parametric generator, BBO crystal, conversion efficiency



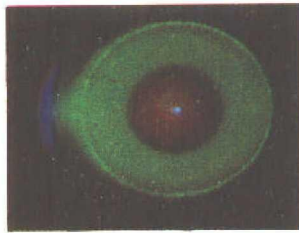
(a)



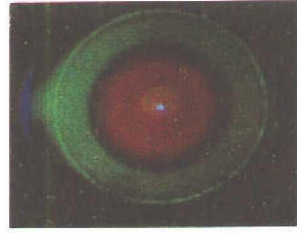
(b)



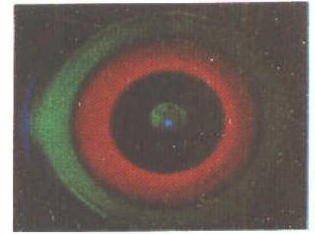
(c)



(d)



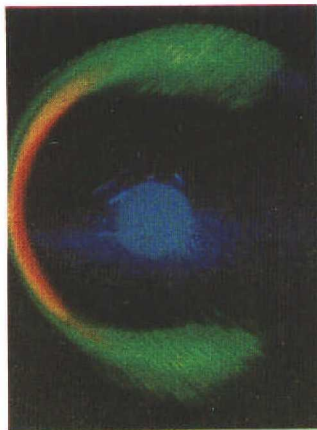
(e)



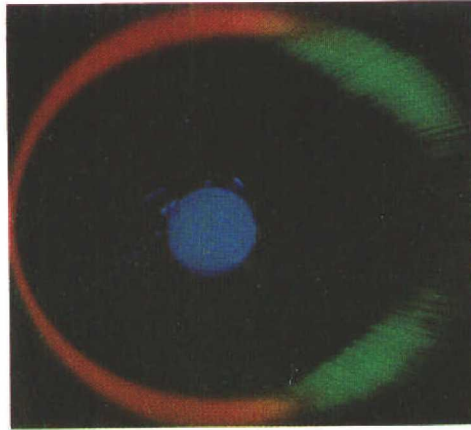
(f)

泵浦光波长 354.7nm; 发散角 1mrad

李港等: 图 5 参量光环



(a)



(b)



(c)

泵浦光波长 354.7nm; 发散角 25mrad

李港等: 图 6 参量光环