

连续泵浦 Nd:YAG 声光调 Q 用 Mg:LiNbO₃ 腔内倍频的研究

王廷福 张纯玉

(西南技术物理研究所)

提要: 本文报导高掺 MgO-LiNbO₃ 晶体的倍频性能和腔内倍频时有关参数的最佳化实验结果。在连续泵浦功率为 3.6 千瓦, 调制频率为 3 千赫的 Nd:YAG 声光调 Q 激光器腔内倍频, 获得平均功率 2 瓦, 脉宽约 300 毫微秒, 峰值功率为 2.3 千瓦, 单程倍频效率为 34% 的绿光输出。

Study on intracavity frequency doubling by Mg:LiNbO₃ for an acousto-optic Q-switched Nd:YAG laser

Wang Tingfu, Zhang Chunyu

(Southwest Institute of Technical Physics)

Abstract: This paper reports the experimental results on the frequency doubling characteristics of Mg:LiNbO₃ crystals (phase matching, photorefractive effect), and the parametric optimization for intracavity frequency doubling. Using Mg:LiNbO₃ for intracavity frequency doubling of an acousto-optic Q-switched (3KHz) Nd:YAG laser (3.6 kW, pumping power), output of green light with an average power of 2W, pulse width of 300 ns, peak power of 2.3 kW and conversion efficiency of 34% at 0.53 μm have been obtained.

一、引言

目前激光倍频材料的种类繁多, 但实际能用于 Nd:YAG 激光器腔内倍频的晶体却很少。其中 BNN 晶体是连续倍频的较好材料, 但它在高重复频率脉冲倍频时, 因表面易损伤等原因, 谐波输出受到限制, 迄今国内外用在声光调 Q 下得到的二次谐波平均功

率未超过 1 瓦。LiNbO₃ 晶体有较大的非线性系数、热导率和接收角、不潮解等优点, 但容易产生光折变。采用改变 Li/Nb 比率的方法, 可提高相位匹配温度, 使光折变得到一定程度的克服, 但当熔体中 Li/Nb 偏离固液同成分点, 晶体的光学均匀性要随 Li 含量的增加而变差, 难于生长出光学质量好的倍频用晶体。本工作采用在固液同成分共熔点组

收稿日期: 1982 年 5 月 6 日。

分中掺 5% MgO 的 LiNbO₃(LN) 晶体, 它具有良好的光学均匀性(双折射率梯度 $\sim 5 \times 10^{-5}$ 厘米⁻¹)和较高的相位匹配温度。

二、相位匹配

掺不同浓度 MgO 的 LN 晶体相位匹配温度 T_{pm} 和相位匹配角 θ_{pm} 的测量结果示于图 1 中。

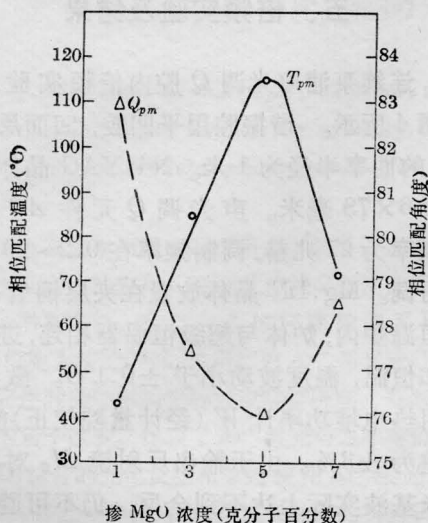


图 1 相位匹配温度和角度与熔体中掺 MgO 浓度的关系
(相位匹配角在 28°C 测量)

Mg:LN 晶体的相位匹配温度高于室温, 并可实现临界相位匹配, 避免了同成分 LN 晶体倍频在 0°C 以下使用的缺点。由于 LN 晶体的双折射率温度系数较大, 约 4.3×10^{-5} /°C, 故环境温度对晶体的相位匹配角有明显的影响, 其值约 9°/°C。

我们还观测了相位匹配与倍频光环的关系。当基波光束通过非线性晶体, 基波波矢和散射光波矢满足非共线相位匹配时, 便产生倍频光。理论计算得单轴晶体满足这一条件的波矢构成一个空心锥面^[1], 因此, 在垂直于基波光束的屏上看到的是一个圆环。对 90° 相位匹配, 当晶体温度 T 低于相位匹配温度 T_{pm} 时, 在亮点的外边有一同心光环, 如

图 2 所示。当光环收缩到中心时, 即达到最佳共线相位匹配温度, 此时转换效率最高, 二次谐波输出功率最大。若晶体的温度高于相位匹配温度, 虽无光环, 但绿光强度明显下降。对于临界匹配, 当光环的边缘与共线匹配的倍频光斑相遇时, 即达到最佳共线相位匹配, 如图 3(b) 所示。不满足共线相位匹配条件的光环, 如图 3(a)、(c) 所示。实验中利用倍频光环, 无论晶体环境温度变化或泵浦功率波动都可方便地确定晶体最佳相位匹配条件。

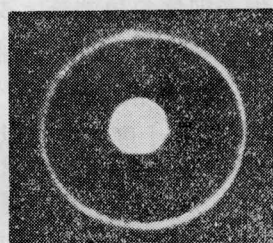
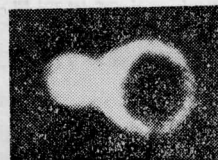
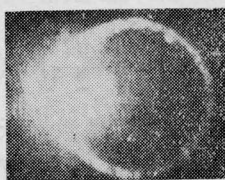


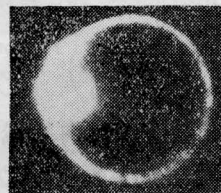
图 2 Mg:LN 90° 相位匹配时的倍频光环 ($T < T_{pm}$)



(a) $\theta < \theta_{pm}$



(b) $\theta = \theta_{pm}$



(c) $\theta > \theta_{pm}$

图 3 Mg:LN 临界匹配时的倍频光环

三、光致折射率变化

对 10 块 Mg:LN 晶体样品进行了实验。在室温下(远离相位匹配温度), 激光器腔外用焦距为 6 厘米的透镜将 1.06 微米连续光束聚焦照射 LN 晶体(10 分钟), 用正交偏光干涉法观测晶体双折射率的变化, 测得 LN

辐照区内增加一根干涉条纹的光功率密度一般 ≥ 20 千瓦/厘米², 其中呈黄色的 LN 晶体 ≤ 12 千瓦/厘米², 这与晶体所含杂质或缺陷有关。实验结果表明: 红外波段的激光不诱发 LN 的折射率不均匀性^[2]的看法是不恰当的。

当晶体出现光折变时, 倍频效率降低, 严重时, 绿光沿晶体 O 轴散开, 以致不能使用。但这种光损伤是可逆的, 采取加温退火的方法可以消除。我们将 Mg:LN 晶体升温至 80°C, 观测到光折变逐渐减弱, 当升温至 130°C 的光折变即能很快消除, 又恢复 Mg:LN 晶体的光学均匀性。Mg:LN 晶体退去光折变的温度比以往所报导的 LN 退火温度 ($\geq 170^\circ\text{C}$) 降低了几十度, 与文献 [3] 所得结果基本一致。

四、最佳耦合

腔内倍频时, 为了得到最大二次谐波输出, 需要满足最佳耦合条件, 即要求非线性参量^[4]

$$K = \frac{2\alpha}{S_0} \quad (1)$$

式中

$$K = 4 \left(\frac{\mu_0}{\varepsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\omega_y^2 d^2 l^2}{n_1^3 C^3} F \sin^2 C^2 \left(\frac{4kl}{2} \right) \quad (2)$$

α 是基波在腔内的线性损耗, S_0 是激光跃迁的饱和功率密度, l 为非线性晶体长度, $F = (\omega_y/\omega_N)^2$ 是功率密度增强系数, ω_y 是激光棒内光束半径, ω_N 是非线性晶体内的光束半径。取 $S_0 \approx 3 \times 10^3$ 瓦/厘米², 对 LN 晶体计算得

$$l^2 F = 2.1 \times 10^3 \alpha \quad (3)$$

腔内连续倍频时, 为了提高倍频效率, 增大 F 值是一个重要因素。实验中用曲率半径分别为 50 厘米和 12 厘米的凹面镜组成凹凹谐振腔, 来压缩 LN 中的光斑尺寸, 明显使二次谐波功率增强, 倍频效果比平凹腔好, 但

倍频效率仍较低(约 1%)。

在声光调 Q 时, 因脉冲工作不仅可提高 Mg:LN 的抗光折变能力, 而且由于峰值功率增大, 使最佳耦合所要求的非线性参量值减小^[5], 相应降低对 F 值的要求。即可适当增大 LN 晶体中的光斑尺寸。采用平凹腔, 在不引起光损伤的较高基波功率下, 获得了高功率二次谐波输出。

五、倍频实验及结果

连续泵浦声光调 Q 腔内倍频实验装置如图 4 所示。谐振腔用平凹腔, 凹面反射镜 M_1 的曲率半径为 1 米。Nd:YAG 晶体尺寸为 $\phi 6 \times 73$ 毫米。声光调 Q 元件 AO 的中心频率为 27 兆赫, 调制频率在 0.2~20 千赫内可调。Mg:LN 晶体放置在夹层铜管制成的恒温炉内, 炉体与超级恒温器相连, 进行加热和恒温, 温度波动小于 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。激光功率用热电堆功率计 W (经计量院校正) 测量, 误差为 $\pm 3\%$ 。由于输出反射镜 M_2 对 1.06 微米基波实际上达不到全反, 仍不可避免有基波逸出, 因此在测量二次谐波功率时, 在功率计前面加了一个滤光片 RF , 将漏出的基波基本上去掉, 它对 0.53 微米光的透过率约 80%。0.53 微米激光脉冲用 PIN 硅光二极管接收, SD-1 型示波器测量。

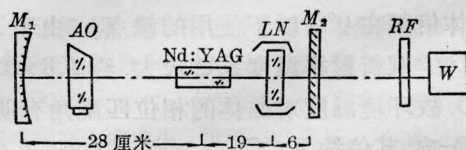


图 4 倍频实验装置示意图

在泵浦功率为 3.6 千瓦, 腔镜间距如图 4 所示的条件下, 实验测得二次谐波输出与 Mg:LN 晶体在腔内位置的关系, 如图 5 所示。它表明, 晶体在腔内有一最佳位置, 该位置与只考虑激光棒的热透镜的影响所确定的不符。这是因为谐振腔内基波功率较高,

(下转第 197 页)

以上讨论的方法适宜于对短寿命能级掩盖的谱线作高分辨光谱研究,它同光学 Ramsey 效应法^[10]的主要区别在于,这种方法除了具有多脉冲量子相干变窄以外,还具有由激光衰减系数与能级衰减系数进行匹配激发而引起的谱线的进一步变窄。这是我们要强调的主要之点。

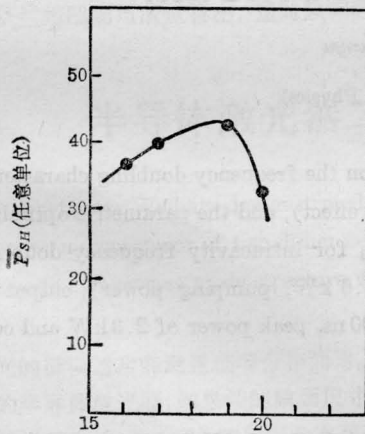
参 考 文 献

- [1] V. S. Letokhov; "High Resolution Laser Spectroscopy", Edit. by K. Shimoda, Springer-Verlag, 1976, Chapt. 4.
 [2] N. Bloembergen, M. D. Levenson; "High Resolution Laser Spectroscopy", 1976, Chapt. 8.

- [3] M. M. Salour; *Annals of Physics*, 1978, **111**, 364~530.
 [4] P. Mystre et al.; *Opt. Commun.*, 1980, **33**, No. 2, 153~157.
 [5] P. L. Knight, P. E. Coleman; *J. Phys. B: Atom. Molec. Phys.*, 1980, **13**, 4345~4352.
 [6] P. E. Coleman; *Opt. Commun.*, 1981, **36**, 127~130.
 [7] J. Chamberlain; "The Principles of Interometric Spectroscopy", Chichester, 1979, P. 47.
 [8] M. Sargent III et al.; "Laser Physics", Addison-Wesley, 1974, Chapt. 2~1.
 [9] M. 玻恩, E. M. 沃耳夫; "光学原理", 上册, 第八章, 科学出版社, 1978 年。
 [10] K. Teets et al.; *Phys. Rev. Lett.*, 1977, **38**, 760~764.

(上接第 200 页)

Mg:LN 晶体因吸收光发热,在晶体内部造成径向温度梯度,亦形成等效的热透镜,它将改变谐振腔的工作状态。故在谐振腔光学设计和调试时,应考虑 Mg:LN 晶体热光效应的影响^[6]。



LN 与激光棒中心的间距(厘米)
 图 5 二次谐波平均功率 \bar{P}_{SH} 与 LN 晶体在腔内位置的关系

实验中还观测到在一定泵浦功率下,为了获得平均功率最大的二次谐波,声光调制频率有一最佳范围。在我们实验条件下为 3 千赫左右。

当连续泵浦功率为 3.6 千瓦,声光调制

频率为 3 千赫, Mg:LN (15×15×10 毫米) 相位失配,输出腔镜在最佳耦合输出时,获得平均功率为 6 瓦的 1.06 微米基波输出。换上对 1.06 微米全反的输出腔镜, Mg:LN 在 115°C 非临界相位匹配时,获得平均功率达 2070 毫瓦,脉宽约 300 毫微秒,峰值功率为 2.3 千瓦的二次谐波输出,单程倍频效率为 34%。

Mg:LN 晶体在 0.53 微米平均功率大于 1 瓦时,有时晶体表面出现斑痕。这种表面损伤与晶体表面加工、增透膜材料、膜内光波模式等有关,为弄清其确切原因,尚待进一步研究。

实验中所用 Mg:LN 晶体是我所仲跻国等同志提供的,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] R. Trebino; *Appl. Opt.*, 1981, **20**, No. 12, 2090.
 [2] 李荫远,杨顺华;《非线性光学》,科学出版社,1974。
 [3] R. L. Byer et al.; *Appl. Phys. Lett.*, 1981, **39**, No. 1, 17.
 [4] R. G. Smith; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1970, **6**, No. 4, 215.
 [5] A. Stein et al.; *Appl. Phys. Lett.*, 1970, **16**, No. 9, 338.
 [6] J. D. Barry et al.; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1975, **11**, No. 8, 575.