

连续泵浦 Nd:YAG 声光调 Q 钕酸钡钠腔内倍频激光器

吴惠法 徐惠德

(中国科学院上海硅酸盐研究所)

方正 程关锴

(上海激光技术研究所)

提要: 在连续泵浦的 Nd:YAG 激光器中采用声光 Q 开关、 $Ba_2NaNb_5O_{15}$ 晶体进行腔内倍频, 获得峰值功率为 2.56 千瓦、重复频率为 1 千赫、脉宽为 75 毫微秒、波长为 0.53 微米的激光输出。并进行了应用实验, 取得了满意的效果。

Intracavity frequency-doubling by BNN crystals in CW Nd:YAG laser pumping with acousto-optic Q-switch

Wu Huifa, Xu Huide

(Shanghai Institute of Ceramics, Academia Sinica)

Fang Zheng, Cheng Guanchang

(Shanghai Institute of Laser Technology)

Abstract: In a continuously pumped and A-O Q-switched Nd:YAG laser, BNN crystal elements are used for intracavity frequency doubling. With this system, a peak output power of 2.56 KW at $0.53\mu\text{m}$, 1KHz repetition rate and 75 ns pulse-width has been obtained. Experiments for application of this system have been carried out, and satisfactory results obtained.

引 言

随着激光与非线性光学的发展, 倍频技术日益成为扩展激光波段、研究光与物质相互作用的重要手段。钕酸钡钠($Ba_2NaNb_5O_{15}$)晶体(以下简称 BNN)因具有大的非线性系数, 能采用多种相位匹配技术, 是一种令人注

目的倍频材料。同时, 由于声光调 Q 比起其他调 Q 方式, 具有驱动电压低, 重复频率高, 温度变化小, 运转寿命长等优点, 因而在需要高重复频率、高峰值功率激光输出的领域中越来越受到重视。我们用 BNN 为倍频材料, 用 ZF-6 玻璃为声光介质, $LiNbO_3$ 晶片为换能器的声光 Q 开关, 进行了连续泵浦

收稿日期: 1981年5月11日。

Nd:YAG 声光调 Q 倍频激光器的研究, 随后, 为上海冶金所的注入 As 离子的 P 型 <111> 晶向与 <100> 晶向硅片进行激光退火实验, 获得了满意的结果。

声光开关与倍频器件

实验中使用的声光 Q 开关器件设计为 Bragg 衍射型, 声光介质为 ZF-6 重火石玻璃, $L=48$ 毫米, 介质中的 Bragg 角 $\theta_B=11'08''$ 。换能器为 $36^\circ Y$ 切割的 LiNbO_3 晶体, 中心频率为 40 兆赫。换能器用真空压钢技术键合到声光介质上, 键合面与通光面的夹角保证当激光垂直入射通光面后, 声波波面与光束方向成 Bragg 角。两个通光面均镀以 1.06 微米增透膜, 每个面剩余反射率小于 0.2%。器件输入阻抗为 50 欧姆, 所需驱动功率小于 5 瓦。驱动源的中心频率为 40 兆赫, 调制频率为 1 千赫至 10 千赫可调。

BNN 晶体用配比接近一致熔触组分的原料生长, 经 580°C 高温及 200 伏/厘米电场极化处理, 350°C 加压 150~180 公斤/厘米² 去孪晶, 再经光学加工成 a 轴长 7.9 毫米, b 轴长 9.2 毫米, c 轴长 7.4 毫米的长方体。两通光面平行度 $6''$, 平面度 $\lambda/4$, a 轴双折射梯度 $\Delta n=3.2 \times 10^{-4}$ 厘米⁻¹, 消光比 20:1; b 轴双折射梯度 $\Delta n=3.7 \times 10^{-4}$ 厘米⁻¹, 消光比 30:1。测试消光比时用 He-Ne 激光器, 其光束直径 1 毫米。

因 BNN 晶体的折射率温度系数 dn_x/dT 及 dn_y/dT 均为负值, dn_z/dT 为正值, 我们采用控制晶体温度的方法实现非临界相位匹配, 并采取 I 类相位匹配, $o+o \rightarrow e$, 基波 o 光折射率与二次谐波 e 光折射率相等, 即

$$n_{2\omega}^o = n_{\omega}^e = 2.26。$$

实 验

实验装置示意图如图 1 所示。激光器工

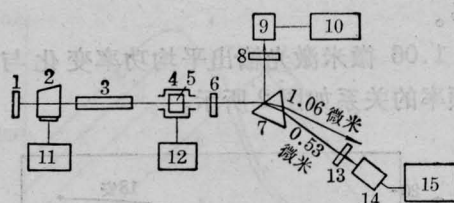


图 1 实验装置示意图

1—全反镜片; 2—声光 Q 开关; 3—Nd:YAG 棒; 4—恒温器; 5—BNN 晶体; 6—输出镜片; 7—色散棱镜; 8—滤光片; 9—GT101 型 PIN 光电二极管; 10—SBM-14 示波器; 11—超声驱动源; 12—控温仪; 13—衰减片; 14—硅光电池; 15—X-Y 记录仪

作物质为 Nd:YAG 棒, 直径 4 毫米, 长 80 毫米。双氦灯泵浦。谐振腔由光谱透过率分别为 1.06 微米、0.53 微米双全反和 1.06 微米全反、0.53 微米高透的两块介质膜片组成。腔长 550 毫米。声光 Q 开关和倍频晶体分别置于 Nd:YAG 棒的前后两侧。倍频晶体置于恒温器内, 恒温器的控温精度可达 $\pm 0.05^\circ\text{C}$, 以保证 BNN 晶体的相位匹配要求。晶体的 c 轴与光束方向垂直, b 轴或 a 轴与光束平行。输出的 0.53 微米线偏振光, 经色散棱镜分光后, 遮去剩余的 1.06 微米红外光, 仅使绿光通过, 再经过透过率为 8% 的衰减片, 用 SPD-102 硅光电池接收, 输入 X-Y 记录仪自动记录 0.53 微米激光的平均功率(该计量系统 1980 年 5 月经国家计量院校正)。

同时, 利用棱镜表面的部分反射, 经窄带滤光片, 用 GT-101 型 PIN 光电二极管接收(其时间响应为 1 毫微秒), 输入 SBM-14 示波器, 显示激光波形, 拍摄波形照片, 测出激光脉宽。

当氦灯输入功率为 16 安 280 伏, 超声频率为 40 兆赫, 调制频率 1 千赫, BNN 晶体温度失配, 谐振腔最佳耦合输出时, 获得平均功率为 400 毫瓦的 1.06 微米激光输出。当 BNN 晶体被加温至 75°C 时, 获得平均功率 192 毫瓦, 脉宽为 75 毫微秒, 峰值功率为 2.56 千瓦的 0.53 微米激光输出。在绿光完全耦合输出的条件下, 能量转换效率大于

22%。

1.06 微米激光输出平均功率变化与调制频率的关系如图 2 所示。

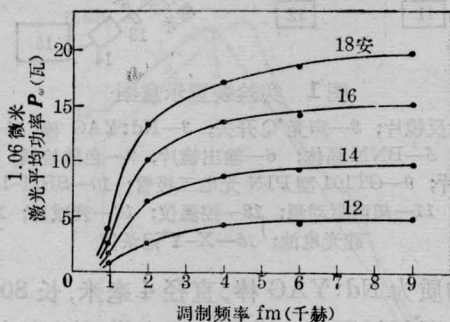


图 2 1.06 微米激光器的平均输出功率与调制频率的关系

实验中表现出 0.53 微米激光的峰值功率随着调制频率的减小而增大, 平均功率随着调制频率的增加而增加, 它们之间的变化关系如图 3 所示。0.53 微米激光脉宽随调制频率的增大而增大, 它们之间的变化关系如图 4 所示。

从图 2 中可以看出, 调制频率在 1 千赫

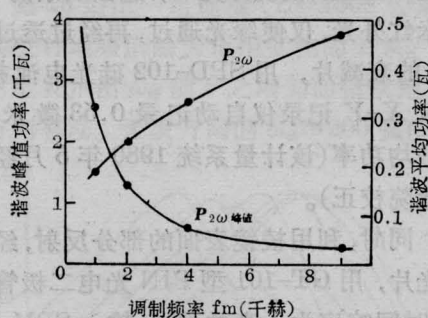


图 3 谐波峰值功率及平均功率与调制频率的关系

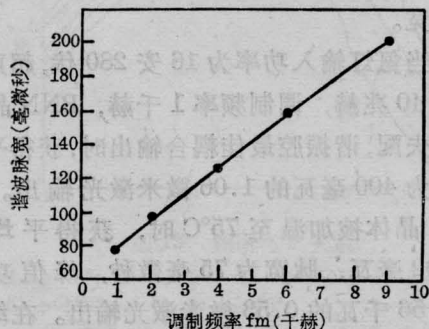


图 4 谐波脉宽与调制频率的关系

到 4 千赫范围内的变化对 1.06 微米激光功率影响较大。此时曲线斜率 dP_{ω}/df 的值大, 也就是说, 器件的频率特性要稳定, 驱动源的频率要稳定, 才能保证 P_{ω} 有稳定输出, 也使 $P_{2\omega}$ 有稳定输出。

由于硅对此波长激光的吸收性较好, 我们用重复频率 2 千赫、峰值功率 875 瓦的 0.53 微米脉冲激光对 P 型 <100> 晶向、<111> 晶向注入 As 离子的无定形 Si 片进行激光退火, 退火后的样品, 经罗瑟福背向散射测定, 离子替位率大于 90%, 得到了较好的效果。

讨 论

实验中发现, 激光脉冲宽度不仅与 Q 开关的重复频率有关, 而且还与光泵水平有关。即使 Q 开关调制频率相同, 输出激光的脉宽还随光泵功率的增大而变小。无论是基波还是谐波, 均有此现象。例如在 4 千赫重复频率下, 光泵电流 12 安、电压 255 伏时, 谐波脉宽为 120 毫微秒, 而在 18 安、295 伏时, 谐波脉宽仅 90 毫微秒。

根据 Q 开关激光器的反转比 η 速率方程:

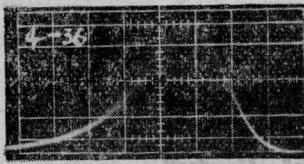
$$\frac{d\eta}{dt} = \omega_p(1-\eta) - \omega_s(1+\eta) - \eta\varphi\omega_i$$

和相对光子密度 φ 速率方程:

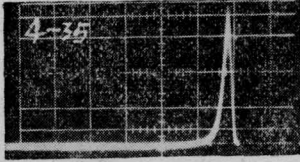
$$\frac{d\varphi}{dt} = -\varphi[\gamma_s + \gamma_0(t)] + \omega_s(1+\eta) + \omega_i\varphi\eta$$

式中 ω_p 为泵浦速率; ω_i 为感应跃迁几率; ω_s 为自然衰减速率; γ_s 表示由于衍射、散射或在端面反射镜上的吸收等附带损耗速率; $\gamma_0(t)$ 表示透过激光器的输出反射镜射出辐射损耗速率。解上述基本速率方程组可知, 激光脉冲的幅值和脉宽与 Q 开关开始前的初始反转比 η_0 有关。泵浦速率大, 初始反转比 η_0 也大, 输出激光脉冲宽度就窄。

此外, 实验中还发现, 在光泵功率、Q 开关重复频率、超声功率、谐振腔结构相同的情况下, 1.06 微米的基波激光脉冲经倍频后有

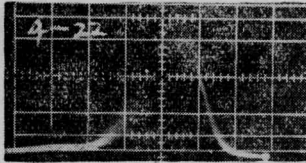


(a)

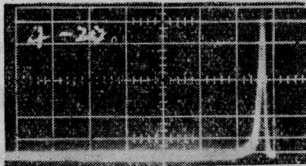


(a)

0.53 微米激光脉冲波形
(脉宽 75 毫微秒)



(b)



(b)

1.06 微米激光脉冲波形
(脉宽 140 毫微秒)

图 5 基波与谐波激光脉宽比较

上图时标 0.05 微秒/厘米;
下图时标 0.5 微秒/厘米

脉宽变窄的现象。如光泵功率 16 安 280 伏, 超声频率 40 兆赫, 调制频率为 2 千赫时, 测得 1.06 微米激光脉宽为 140 毫微秒, 而同样条件下 0.53 微米脉宽为 75 毫微秒, 见图 5 照片。这与微微秒激光超短脉冲经倍频后脉宽增大的情况恰恰相反。这是因为这里的二次谐波功率 $P_{2\omega}$ 为

$$P_{2\omega} = 2 \left(\frac{\mu_0}{\varepsilon} \right)^{3/2} \frac{\omega^2 d^2 l^2}{n^3} \frac{P_{\omega}^2}{A} \times \frac{\sin^2(\Delta kl/2)}{(\Delta kl/2)^2}$$

式中 μ_0 为导磁系数; ε 为介电常数; ω 为基波光频率; d 为非线性系数; l 为晶体在通光方向上的长度; n 为折射率; P_{ω} 为基波功率; A 为激光束截面积。在谐振腔、BNN 相位匹配条件不变的情况下, 式中除了变量 P_{ω} 以外, 其余的都可以看作常数, 那么 $P_{2\omega}$ 与 P_{ω} 就成平方的函数关系, 亦即 $P_{2\omega}$ 与时间的函数关系相似于 $P_{\omega}^2(t)$ 的函数关系, 谐波脉冲的波形是基波脉冲平方的波形, 所以脉宽变窄。W. F. Hagen 和 P. C. Magnante^[3] 也观察到用 Q 开关产生二次谐波时, 谐波脉冲相对于基波脉冲出现脉宽变窄的现象。他们认为谐波功率密度 S_2 与基波功率密度 S_1 有如下关系:

$$S_2/S_1 = \tan^2 h^2(\alpha_0 S_1^2)$$

式中 α_0 是与非线性材料的长度、折射率、非线性系数等有关的系数。如果已知基波脉冲形状, 即可由此关系式导出脉冲变窄。

另外, 关于 BNN 晶体的光损伤问题, 据报导^[4,5], 用 BNN 做倍频实验, 在几十瓦的激光功率下, 有的样品会出现光损伤。而我们用的 BNN 晶体是用重结晶原料生长的, 质量优异, 增强了抗光损伤能力, 同时我们采用适当的谐振腔结构, 使通过 BNN 晶体的光束直径增大, 并采取不使激光峰值功率突然上增的调试技术, 避免了上述的光损伤现象。

本文承蒙中科院上海硅酸盐所研究员

张绶庆及副研究员谭浩然指导, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] Interactive Radiation Inc; Specifications of Model 5~8 SHG System for Nd:YAG Lasers, 1980.
- [2] Holobeam Laser Inc; *Laser Focus*, 1978, No.12, 12.
- [3] W. F. Hagen, P. C. Magnante; *J. Appl. Phys.*, 1969, **40**, No. 1, 219.
- [4] Ken-ichi Hori *et al.*; *FUJISU Scientific and Technical Journal*, 1973, 105.
- [5] AD 729681, 1971.