

LD 泵浦 Nd:BGO 晶体的自调 Q 激光器*

周复正 薛 强 胡文涛 李植森 沈丽青 范滇元

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

冯锡淇 胡关钦 殷之文

(中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 200050)

摘 要 首次实现了 LD 泵浦 Nd:BGO 固体激光器的 $1.064 \mu\text{m}$ 的激光输出, 泵浦阈值功率为 25 mW, 在连续运转状态下得到最大为 40 mW 的 TEM₀₀ 模输出, 光-光效率为 13.3%. 根据法拉第磁光效应理论, 计算了 LD 泵浦 Nd:BGO 自调 Q 激光器的各种参数, 并研制成该激光器, 在该器件中, 作为损耗调制元件的磁光调制器就是绕有线圈的 Nd:BGO 晶体本身. 实验在重复率为 1 KHz 的条件下得到了 FWHM 为 100 ns 的稳定脉冲.

关键词 二极管泵浦, 调 Q 激光器, Nd:BGO 晶体.

1 引 言

八十年代以来由于高功率激光二极管(LD)的发展使激光二极管泵浦的固体激光器(DPL)得到了复兴, 1986 年以来平均每年有近 150 篇关于 DPL 的报道文章^[1]; 在每年的 CLEO 会议上 DPL 也已成为一个重要部分. 有关 DPL 的报道一方面是激光技术如调 Q、锁模、倍频、参量振荡、单频、稳频等, 另一方面是有关新材料的, 至今可用 LD 泵浦的固体激光介质已由原来的 Nd:YAG、Nd:YLF 和 Nd:Glass 等少数几种发展到掺 Nd、Cr、Er、Tm、Ho 等稀土离子的数十种晶体和玻璃材料^[2,3,4]; 人们还在继续寻求适合用 LD 泵浦的发射波长从可见光到中红外的优良激光介质.

BGO 晶体在 70 年代曾被作为一种有前途的激光基质晶体进行过广泛的研究^[5,6], 但由于以下两方面的原因而遭到挫折: 一是 Bi³⁺ 的吸收系数高, 泵浦光穿透晶体的深度浅; 二是紫外区的泵浦光在晶体中诱发色心. 此后大量的研究转向 BGO 作为闪烁晶体的应用并取得巨大成功^[7]; 与此同时, BGO 晶体本身的研究也取得了很大进展, 比如用布里奇曼法生长高光学质量、大尺寸(大于 $50 \times 50 \times 300 \text{ mm}$)的 BGO 晶体的技术达到成熟; 采用加入微量稀土的方法成功地抑制了 BGO 晶体中色心的形成等等. 最近, BGO 作为激光介质的应用取得了重要进展, 即在 1990 年 12 月, 英国南安普敦大学采用我国研制的 Nd:BGO 晶体(尺寸为 5×5

* 本课题为国家自然科学基金资助项目.

收稿日期: 1993 年 11 月 1 日; 收到修改稿日期: 1993 年 12 月 14 日

×5 mm), 以波长为 590 nm 的若丹明 6G 染料激光作泵浦源, 实现了 1.064 μm 的连续激光输出, 阈值吸收功率为 25 mW, 斜效率为 14%, 最大输出功率为 21 mW. 迄今, 国内外文献尚未见 LD 泵浦 Nd:BGO 固体激光器的报道; 本文实现了 LD 泵浦 Nd:BGO 固体激光器的 1.064 μm 连续激光输出, 并利用晶体本身所具有的磁光特性研制成自调 Q 激光器, 得到稳定的脉冲激光输出.

2 晶体特性

锗酸铋 ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$, 简称 BGO) 是一种立方晶体, 属 $\bar{4}3m$ 点群, 与天然的硅铋矿 $\text{Bi}_4\text{Si}_3\text{O}_{12}$ 同晶型, 在 0.3~6 μm 波段有良好的透过率, 并且是各向同性的, 莫氏硬度为 5, 易于加工. 当三价的稀土离子 Re^{3+} 进入点阵时可直接取代 Bi^{3+} 离子而无需电荷补偿. 掺 Nd^{3+} 离子的 BGO 晶体是一种很有前途的激光介质, 同时它还具有优良的电光和磁光特性, 其磁光费尔德常数 (Verdet constant) 为 330 min/cm·T, 是熔石英的 7 倍, 因此可利用 BGO 晶体的多功能特性设计出激光/调制, 激光/开关, 激光/光隔离等复合功能器件.

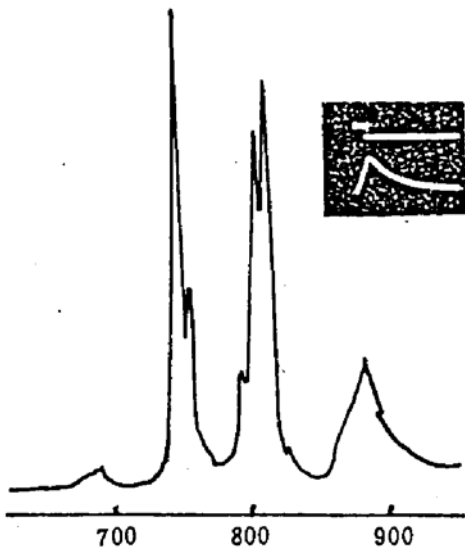


Fig. 1 Absorption spectra and fluorescent lifetime of a 1.0%-doped Nd:BGO crystal

本研究工作中所用的 Nd:BGO 晶体是由中国科学院上海硅酸盐研究所研制的. 晶体是用改进的布里奇曼法生长的, 即先从熔融的纯度为 5 N 的 Bi_2O_3 和纯度为 6 N 的 GeO_2 混合物中生长出大块晶体, 两种组分的摩尔比为 2:3, 然后以该晶体为原群, 掺入高纯度的 Nd_2O_3 , 选择合适的生长工艺生长出高掺杂的 Nd:BGO 晶体. 该晶体具有良好的光学质量, 晶体内无明显的生长缺陷 (如条纹、包裹物等). 图 1 为 Nd:BGO 晶体在 700~900 nm 的吸收谱, 从中可以看出在 802 nm 和 810 nm 附近各有一强吸收带, 其宽度约为 5 nm, 因此十分适合用 LD 泵浦. Nd:BGO 晶体的主要荧光带位于 1.064 μm 和 0.344 μm 附近, 1.064 μm 的受激发射截面为 $1.34 \times 10^{-19} \text{cm}^2$. 该晶体掺杂 1.0 wt% 的 Nd_2O_3 , 在 810 nm 处的吸收系数为 6cm^{-1} , 比同样掺杂的 Nd:YAG 稍大. 晶体在室温下的荧光寿命为 320 μs, 在 810 nm 处的折射率为 2.0694.

3 LD 泵浦 Nd:BGO 的连续激光输出

实验采用纵向泵浦结构, LD 的型号为 SDL-2430-HI, 连续输出的最大功率为 500 mW, 在准连续运转时发射光谱的中心在 810 nm, 正好落在晶体的主吸收峰上. 耦合系统由两块非球面镜组成, 其焦距分别为 110 mm 和 80 mm, 耦合效率为 70%. Nd:BGO 晶体的尺寸为 $4 \times 4 \times 5 \text{mm}$, 一端为 $R=50$ 的球面, 作为输入端, 镀有双色膜 (对 810 nm 透过率大于 85%, 对 1.06 μm 反射率大于 99.5%), 另一端为平面, 镀有 1.06 μm 的高增透膜. 输出镜的曲率半径为 50 mm, 对 1.06 μm 的透过率为 4%, 输出镜与棒端相距 10 mm.

在激光器的调整阶段, LD 以准连续方式泵浦, 脉宽 $400 \mu\text{s}$, 重复率 100 Hz . 当在示波器上看到的弛豫振荡信号为最强时, 器件调整到最佳状态; 此时改用连续泵浦, 就获得了最佳的连续输出.

图 2 所示为准连续泵浦时的激光弛豫振荡波形.

图 3 所示为连续激光输出时用 CCD 记录的激光近场分布以及通过计算机处理得到的光强的空间分布图, 可以看到激光的模式为很好的 TEM_{00} 模.

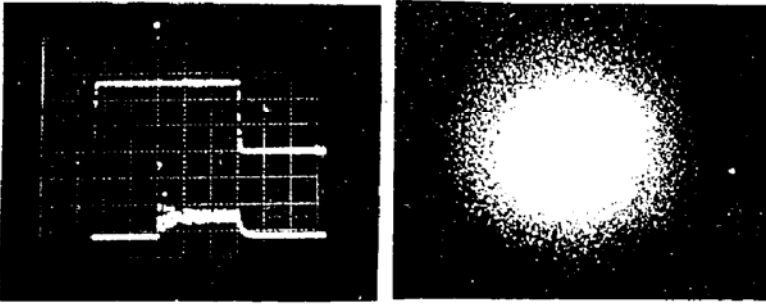


Fig. 2 Relaxation waveforms of the Nd:BGO resonator,
(a) Electric driving pulse, (b) Relaxation waveforms

Fig. 3 CW output of TEM_{00} -mode Nd:BGO laser

该激光器的泵浦阈值功率为 25 mW , 当泵浦光功率增加到 300 mW 时, 输出功率为 40 mW , 光-光效率为 13.3% . 这个结果与引言中提到的用染料激光泵浦所得到的结果相近. 值得一提的是: 该器件的性能可以通过泵浦耦合系统的优化设计来大幅度改善.

4 LD 泵浦 Nd:BGO 自调 Q 固体激光器

4.1 原理与设计

调 Q 激光器中的关键元件是损耗调制器, 本器件中的损耗调制器是磁光调制器, 它是由绕有多匝线圈的 Nd:BGO 晶体和一块外加的布儒斯特片构成的(更为紧凑的方法是直接将晶体的一个端面加工成布氏角而不需外加布氏窗片). 在谐振腔内有布氏窗的情况下, 自由振荡的激光总是电矢量沿 P 方向的线偏振光, 假如在 LD 开始泵浦时, 通过一同步系统给绕在晶体上的励磁线圈加上强电流, 从而在光轴方向产生一个强磁场, 由于晶体具有法拉第旋光效应, 腔内光束每往返一次其偏振方向都要产生 θ 角的旋转, 从而偏离 P 偏振方向在布氏窗上产生反射损耗 δ_m , 使谐振腔处于高损态, 若 δ_m 足够大(即磁场足够强), 激光振荡就全被抑制, 从而使激光上能级的粒子数不断积累, 在泵浦结束前的瞬间退去励磁电流, 则磁场在短时间内趋于零, 相应的偏振损耗也趋于零, 这时累积在激光上能级的反转粒子数就雪崩式地跃迁到激光下能级, 形成调 Q 脉冲.

假设励磁线圈可近似为一无限长通电直螺线管, 则其轴线上的磁场处处相等, 且由下式确定:

$$B = \mu NI/L \quad (1)$$

式中, L 为线圈的长度, N 为线圈的匝数, I 为励磁电流. 我们所选的参数为: $L = 5 \text{ mm}$, $N = 50$, $I = 100 \text{ A}$; 则 $B = 1.256 \text{ T}$.

根据法拉第旋光定律, 腔内光束往返一次, 其偏振方向的旋转角为:

$$\theta = 2 \Gamma_{\text{BGO}} BL_{\text{BGO}} \tag{2}$$

式中, Γ_{BGO} 为 BGO 晶体的费尔德常数, B 为晶体中心的磁感应强度, L_{BGO} 为晶体长度. 代入各变量的值得: $\theta = 411'$.

当 Q 开关处于关断状态时, 调制损耗的平均值可通过下列本征矩阵的本征值求得, 本征矩阵为:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & q^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & q^2 \end{bmatrix}$$

矩阵中, $q = 2n/(n^2 + 1)$, 是 s 偏振光在布儒斯特片上的透射系数, n 是布儒斯特片的折射率, 上述合成矩阵的本征值 γ 的表达式为:

$$\gamma = (1 + q^4) \cos \theta / 2 \pm (\sqrt{(1 + q^4)^2 \cos^2 \theta - 4q^4}) / 2$$

将 n 和 θ 的值代入上式, 得到: $\gamma_1 = 0.94$, $\gamma_2 = 0.78$. 激光模总是选择损耗小的方式自再现, 所以平均调制损耗 δ 应由 γ_1 来确定, 即:

$$\delta = 1 - \gamma_1^2 = 11.6\%$$

由于泵浦速率不高, 11.6% 的调制损耗可以抑制激光的弛豫振荡.

磁光调制器的开关速度取决于励磁线圈的退磁速度. 开关时间近似为 $\tau = l/R$, 式中 l, R 分别为励磁线圈的自感系数和电阻. 设计的线圈是用 0.1 mm 的绝缘铜丝绕制的, $\tau \approx 2 \mu\text{s}$. 所以磁光开关是一个很慢的慢开关, 在脉冲输出的瞬间, 法拉第效应产生的偏振损耗尚未退回到零, 故脉冲的能量萃取效率不高.

4.2 实验结果

实验装置如图 4 所示. 泵浦源 LD 为国产器件, 最大输出功率可达 1 W, 实验时工作在准连续状态, 驱动电流脉宽为 400 μs , 重复率为 1 KHz. 在泵浦开始时, LD 的驱动源产生一个同步信号去触发励磁线圈的驱动电源, 使之输出大电流产生强磁场, 从而抑制激光振荡, 调节励磁电脉冲的脉宽, 使之略小于 LD 驱动脉冲的脉宽, 这样可在泵浦结束前的瞬间退磁以产生大脉冲. 励磁电流幅度 10~200 A 可调, 脉宽 50~400 μs 可调.

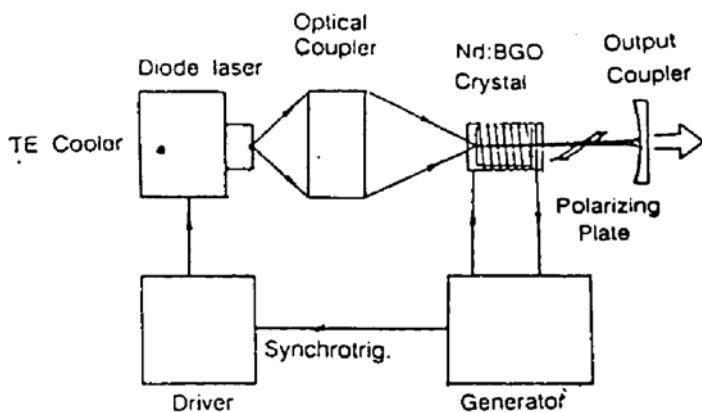


Fig. 4 Schematic of a self Q-switched Nd : BGO laser pumped by diode laser

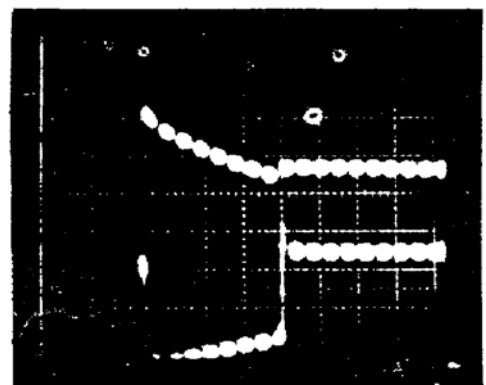


Fig. 5 The initial process of magneto-optic Q-switch. the upper trace indicates the fall-time of the driving current in the coil, and the lower trace indicates the induced voltage which is directly proportional to the slope of changing of magnetic field

实验用 FD-1 光电二极管(响应时间为 2 ns)探测 Q 脉冲,用存储示波器观察波形并用照相法记录.

图 5 中,上方的曲线是励磁线圈的驱动电流的下降沿波形;下方一条曲线是通过一只与励磁线圈同轴放置的螺线管获得的信号,它是感生电动势,正比于励磁电流下降过程中磁场变化的斜率.从这幅照片可以看到:当励磁电流开始下降时,磁场几乎是线性衰减(斜率为一个负的常数),当电流降为零时,磁场也衰减到零.因此,实验中检测到的励磁电流下降沿决定了磁光调制器的退磁时间,约为 7 μs .

图 6 所示的曲线自上而下分别为 LD 驱动电源脉冲波型、磁响应波型和调 Q 脉冲波型、以及 Q 脉冲的时间展宽波型.从中可以清楚地看到励磁线圈的退磁过程和调 Q 脉冲在时间轴上的位置,大约在 4 μs 时反转粒子数达到阈值,脉冲开始建立,到 5 μs 时脉冲输出.实验得到了稳定的脉冲,脉宽为 100 ns,波形起伏为 $\pm 0.5\%$.用灵敏能量计测得单脉冲能量为 2 μJ ,峰值功率为 20 W,光-光效率为 4%.

该器件还可以进一步紧凑化,即不外加布氏窗片而是直接将 BGO 晶体的一个端面加工成布氏角.不过,由于 BGO 的折射率高于这里所用的布氏窗的材料,从以上的计算中可以看出,要获得相当的调制损耗,必需加更大的励磁电流.

5 结 论

1. 实现了 LD 泵浦 Nd:BGO 固体激光器的 1.064 μm 的激光输出,泵浦阈值功率为 25 mW,光-光效率为 13.3%.

2. 证实 Nd:BGO 不仅是一种优良的激光介质,还是一种优良的磁光介质,利用这一特性设计并研制成自调 Q 激光器,获得了 100 ns 的稳定脉冲输出.若改善励磁线圈的驱动电脉冲的性能,提高下降沿陡度,则可改善激光脉冲特性.

参加本工作的还有沈小华,陈有明,马建伟.

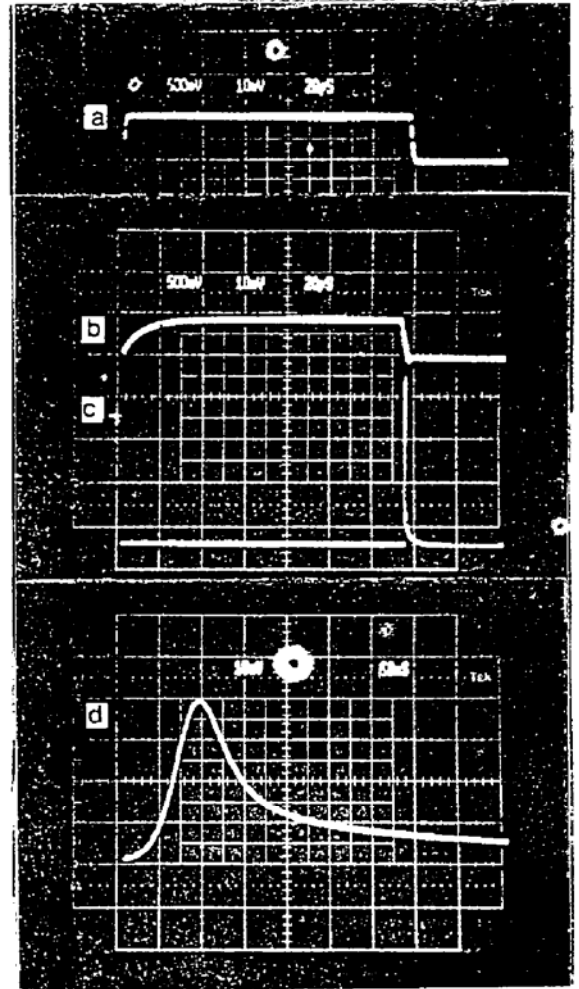


Fig. 6 Performing process of the self Q-switched Nd: BGO laser

a) LD pulse b) magnetic pulse c) Nd: BGO laser pulse d) temporal profile of Q-switched Nd: BGO laser

参 考 文 献

- [1] D. W. Hughes, J. R. M. Barr, Laser diode pumped solid state lasers. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1992, 25(4): 536 ~ 586

- [2] L. Esterowitz, Diode-pumped holmium, thulium, and erbium lasers between 2 and 3 μm operating CW at room temperature. *Opt. Engng.*, 1990, **29**(6) : 676~680
- [3] R. Scheps, Cr : LiCaAlF₆ laser pumped by visible laser diodes. *IEEE J. Q. E.*, 1991, **27**(8) : 1968~1970
- [4] P. Laporta, S. de Silvestri, V. Magni *et al.*, Diode-pumped Cw bulk Er : Yb : Glass laser. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(24) : 1952~1954
- [5] S. K. Dickinson, R. M. Hilton, H. G. Lipson, Czochralski synthesis and properties of rare-earth-doped bismuth germanate (Bi₄Ge₃O₁₂). *Mater. Res. Bull.*, 1972, **7** : 181
- [6] M. J. Weber, R. R. Monchamp, Luminescence of Bi₄Ge₃O₁₂ : spectral and decay properties. *J. Appl. Phys.*, 1973, **44**(18) : 5495
- [7] K. Takagi, T. Oi, T. Fukazawa, Improvement in the scintillation conversion efficiency of Bi₄Ge₃O₁₂ single crystal. *J. Cryst. Growth*, 1981, **52**(4) : 584

Self Q-Switched Nd : BGO Laser Pumped by Laser Diode

Zhou Fuzheng Xue Qiang Hu Wentao

Li Zhiseng Shen Liqing Fan Dianyuan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Feng Xiqi Hu Guangqing Ying Zhiwen

(Shanghai Institute of Ceramics, Academia Sinica, Shanghai 200050)

(Received 1 November 1993; revised 14 December 1993)

Abstract Nd : BGO is a promising laser crystal as well as a useful magneto-optic medium. A diode laser pumped Nd : BGO laser at 1.04 μm has been succeeded for the first time. CW output power of 40 mW with TEM₀₀ mode and efficiency of 13.3% have been obtained. The pumping threshold is 25 mW. Using the faraday rotational effect, we calculated the parameters of the diode laser pumped self Q-switched Nd : BGO laser. In which the magneto-optic modulator consists of the Nd : BGO crystal itself and a Brewster glass plate. Pulsed energy of 2 μJ with width of 100 ns has been detected at a repetition rate of 1 KHz.

Key words laser diode pumping, Q-switched laser, Nd : BGO crystal.