

# 硼酸铝钕 $[\text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4]$ (NAB) 的脉冲激光特性

黄奕川 邱闽旺 陈光 陈继明 罗遵度

(中国科学院福建物质结构研究所)

**提要:** 本文报道了我所生长的大尺寸硼酸铝钕晶体的脉冲激光特性。当用氙闪光灯泵浦时,  $\phi 3.2\text{mm} \times 23.7\text{mm}$  的 NAB 激光棒, 最大激光输出为每个脉冲 422 mJ。对于  $\phi 1.8\text{mm} \times 2.4\text{mm}$  的激光棒, 激光阈值为 67 mJ。激光输出为线性偏振光, 波长  $1.063\ \mu\text{m}$ 。用 BDN 染料片调 Q 时,  $\phi 1.2\text{mm} \times 8.4\text{mm}$  的 NAB 棒激光单脉冲宽度为 8 ns, 光束发散度为 2 mrad。

## Pulsed laser characteristics of neodymium aluminum borate $[\text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4]$ (NAB) crystals

Huang Yichuan, Qiu Minwang, Chen Guang, Chen Jiming, Luo Zundu

(Fujian Institute of Material Structure, Academia Sinica, Fuzhou)

**Abstract:** This paper presents the pulsed laser characteristics of laser NAB crystals grown in our institute. The maximum laser output of a NAB rod with dimensions of  $\phi 3.2\text{mm} \times 23.7\text{mm}$  was 422 mJ a pulse when it was pumped with a single xenon flashlamp. The laser threshold of a NAB crystal rod with dimensions of  $\phi 1.8\text{mm} \times 2.4\text{mm}$  was determined to be 67 mJ. By using BDN dye for switching, the laser pulse width of a NAB rod with dimensions of  $\phi 1.8\text{mm} \times 8.4\text{mm}$  was 8 ns. The output laser beam was linearly polarized with beam divergence angle of about 2 mrad and wavelength of  $\lambda = 1.063\ \mu\text{m}$ .

### 一、引言

硼酸铝钕  $[\text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4]$  (缩写 NAB) 作为一种高钕浓度、低阈值、高增益的激光晶体<sup>[1]</sup>, 从七十年代中期开始就引起国内外激光工作者的重视, 但由于晶体生长的困难, 人们往往把它加工成几百个  $\mu\text{m}$  的晶片或  $1 \sim 2\text{mm}$  的小晶体; 用另一台激光器作为泵浦源

开展实验, 研究其激光特性。例如, 用染料激光器<sup>[2]</sup>、氩离子激光器<sup>[3]</sup>、氙离子激光器<sup>[4]</sup>、或用调 Q 的 Nd:YAG (或 Nd 玻璃) 激光器的第二次谐波<sup>[5]</sup>作为泵浦源; 还有用高强度发光二极管和激光二极管来激励的<sup>[6]</sup>。前几年, 我所<sup>[8]</sup>和山东大学<sup>[9]</sup>曾先后用脉冲氙灯激励实现了 NAB 的激光运转, 但激光输出仍很低。因而未能对 NAB 的激光特性作较全面

收稿日期: 1986年7月11日。

的报道。

两年来, 我所江爱栋等人采用新的助熔剂体系, 用熔盐法生长, 获得了光学均匀性较好、尺寸为  $\phi 3.2 \times 23.7 \text{ mm}^3$  的激光棒晶体, 使我们有可能进一步研究 NAB 晶体在脉冲氙灯激励下的激光性能。

## 二、NAB 的物理化学性质

硼酸铝钕(NAB) 是最早被研究的一种非磷酸盐的化学计量比激光晶体(自激活激光晶体)。根据激活离子浓度猝灭效应与晶体化学组成关系的理论<sup>[10]</sup>, 我们认为: 在自激活激光晶体中, 钕离子若由共价性较强的键(或基团)隔离, 其发光浓度猝灭效应一般较弱。

我们还用参数  $I = \Delta\alpha \cdot \frac{R_+}{R_-}$  ( $\Delta\alpha$  是键或基团中阴阳离子的电负性差值,  $R_+$  是阳离子半径,  $R_-$  是阴离子半径) 来衡量这种隔离作用的强弱。另外, 在  $I$  值小的基质中, 钕离子的发光量子效率一般也比较大。我们的实践证明这种认识是符合实际的。由于 NAB 晶体中  $(\text{BO}_3)$  基团的  $I = \Delta\alpha \cdot \frac{R_B}{R_O}$  特别小(其中  $\Delta\alpha$  是 B-O 的电负性差值), 这种材料必定是一种发光浓度猝灭效应小、效率高的自激活激光晶体。这正是我们选择它作为研制对象的原因之一。

NAB 晶体的高达  $5.43 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$  的钕浓度和  $8.0 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$  的大发射截面以及很低的猝灭效应使它具有增益高和激光阈值低的性能, 当它在高激励强度下运转时这种特点更为显著。实际上, 由于 NAB 的浓度高, 只要泵浦辐射被晶体表层  $50 \sim 100 \mu\text{m}$  这样短的距离吸收, 晶体中获得的反转密度所产生的增益就已足够了, 我们的实验也反映了这一点。值得注意的是, NAB 晶体在最大的 Nd 浓度时, 荧光寿命约为  $20 \mu\text{s}$ , 即使在较低浓度下, 所得到的荧光寿命也仅为  $50 \mu\text{s}$  左右。我们所测得的吸收光谱、荧光光谱

和荧光寿命与有关文献报道一致。

NAB 晶体的物化性能良好, 不潮解, 不解理, 能耐强酸强碱, 硬度与 YAG 晶体相当。这是一种可以长期正常使用而不会损坏或使性能降低的激光工作物质。因为: 第一, NAB 象其它硼酸盐材料一样, 其激光破坏阈值远远高于中小型激光器件使用的功率密度水平; 第二, NAB 是以共价键结合的  $\text{BO}_3$  基团为基本构造单元堆积起来的晶体, 这种结构特点使它在光(包括紫外波段的光)的激励下不会产生那种在离子性较强的晶体中易于产生的色心等点缺陷, 我们的实验已证明了这一点。

## 三、实验结果

### 1. 激光阈值

在我们的实验系统中, 采用平行平面谐振腔, 输出端反射镜的透过率为  $T=4\%$ 。用  $\phi 3 \times 23 \text{ mm}^3$  的氙闪光灯泵浦, 对于  $\phi 1.8 \times 2.4 \text{ mm}^3$  的激光棒, 当输入能量为  $645.38 \text{ mJ}$  时, 在 466 型存储示波器上观察到激光阈值单脉冲波形。如考虑到晶体长度与泵浦灯、聚光腔的不匹配因素进行折算, 可求得 NAB 晶体的阈值约为  $67 \text{ mJ}$ 。对其它几根 NAB 激光棒进行测量, 结果表明, 随 NAB 棒长度的增加, 阈值稍有增大。但总的来说, NAB 的激光阈值是比较低的。

### 2. 输出能量

图 1 分别绘出了  $\phi 1.9 \times 8.4 \text{ mm}^3$ 、 $\phi 3.3 \times 9.2 \text{ mm}^3$  和  $\phi 1.96 \times 17.4 \text{ mm}^3$  的 NAB 晶体, 因输出镜透过率不同, 激光输出能量随氙灯输入能量的函数关系。从图中可以看出, 当输出镜的透过率  $T \approx 60\%$  时,  $\phi 1.9 \times 8.4 \text{ mm}^3$  和  $\phi 3.3 \times 9.2 \text{ mm}^3$  的 NAB 晶体获得较大的激光输出, 斜率效率分别为  $0.5\%$  和  $1.24\%$ ; 当输出镜透过率  $T \approx 72\%$  时, 能使  $\phi 1.96 \times 17.4 \text{ mm}^3$  的晶体棒获得较大输出, 其斜率效率为  $1.1\%$ 。当用  $\phi 3 \times 30 \text{ mm}^3$  的

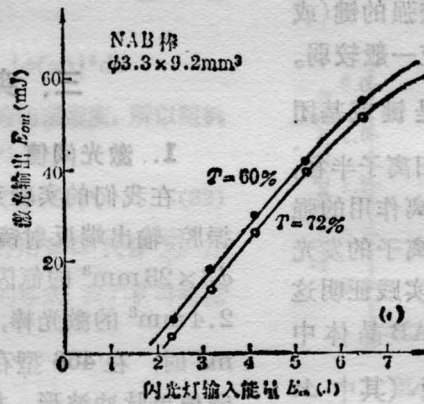
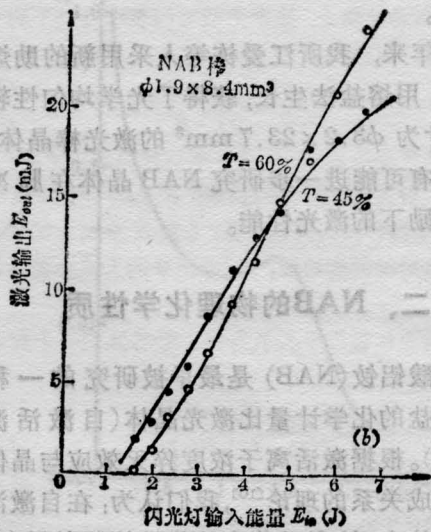
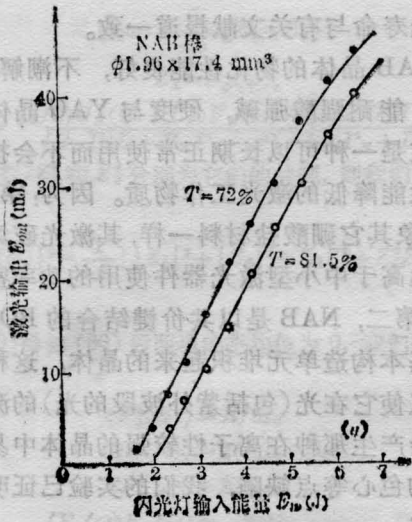


图1 用单直管闪光灯泵浦的NAB激光输出与输入能量的函数关系  
(T为输出镜透过程)

氙灯泵浦时， $\phi 3.3 \times 9.2 \text{ mm}^3$  的NAB棒获得 141.2 mJ 的激光输出，当用  $\phi 10 \times 70 \text{ mm}^3$  的闪光灯泵浦时， $\phi 3.2 \times 23.7 \text{ mm}^3$  的晶体棒获得了 440.0 mJ 的激光输出。

我们使用两只反射率  $R_1$  不同的输出反射镜，并测量其达到 NAB 激光阈值时氙灯的输入能量  $P_{th}$ ，那么晶体的泵浦系数  $K$  和综合光损耗  $L$  可由下式求得<sup>[7]</sup>：

$$K = \frac{\ln(R_1'/R_1'')}{2(P_{th}'' - P_{th}')}$$

$$L = \frac{P_{th}'' \ln(R_1') - P_{th}' \ln(R_1'')}{P_{th}'' - P_{th}'}$$

我们分别计算出  $\phi 1.8 \times 8.4 \text{ mm}^3$  以及  $\phi 1.96 \times 17.4 \text{ mm}^3$  两根激光棒的泵浦系数  $K$  和综合光损耗  $L$ ，其结果如下表。

NAB 激光棒尺寸 (mm <sup>3</sup> )	$R_1'$	$R_1''$	$P_{th}'$ (J)
$\phi 1.9 \times 8.4$	94%	82%	0.7079
$\phi 1.96 \times 17.4$	82%	73%	0.7514

NAB 激光棒尺寸 (mm <sup>3</sup> )	$P_{th}''$ (J)	$K$ (J <sup>-1</sup> )	$L$
$\phi 1.9 \times 8.4$	0.8898	0.38	0.467
$\phi 1.96 \times 17.4$	0.8899	0.42	0.43

令激光棒小信号增益为  $G_0$ ，则有  $\ln G_0 = g_0 l$ ，其中  $g_0$  为单位长度内的增益， $l$  为棒长 (cm)，

$$\ln G_0 = g_0 l = K E_{in}$$

$$G_0 = e^{g_0 l} \text{ 或 } G_0^* = 10 \times \lg G_0 \text{ (dB)}$$

由此，我们即可根据  $K$  值计算并绘出小信号单程棒增益与灯输入功率的函数关系，

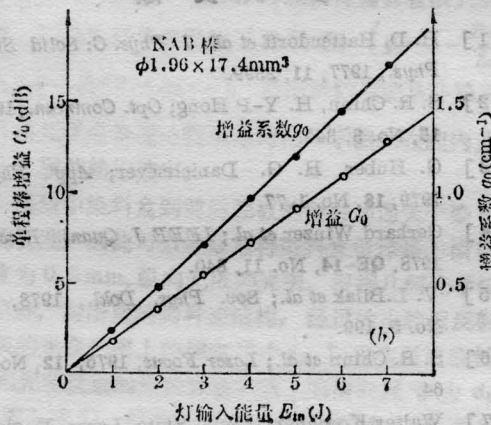
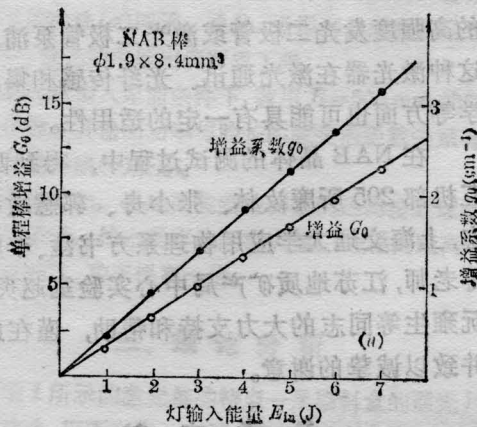


图2 小信号单程棒增益和增益系数与灯输入能量的函数关系

见图2。

### 3. 激光动态输出

在输出镜透过率不同的情况下，我们用透过率为  $T=41.6\%$  和  $T=50\sim 60\%$  的染料片作为调Q元件，插入腔中，观察  $\phi 1.9 \times 8.4 \text{ mm}^3$  和  $\phi 1.96 \times 17.4 \text{ mm}^3$  两根晶体的最大调Q输出为  $25 \text{ mJ}$ 。

当输出镜透过率为  $T=60\%$ ，染料片透过率  $T_d=50\sim 60\%$  时，我们获得了  $2.2 \text{ mJ}$  的单脉冲输出(输入为  $1.82 \text{ J}$ )，单峰域为  $530\sim 600 \text{ V}$  (储能电容  $6.1 \mu\text{F}$ )。

图3是激光单脉冲、多脉冲、激光弛豫振荡波形及激光调Q单脉冲波形。调Q激光单脉冲宽度为  $8 \text{ ns}$ ，激光静态输出的脉冲宽度约为  $300 \text{ ns}$ ，

从测得的数据看，NAB的单峰域较窄，

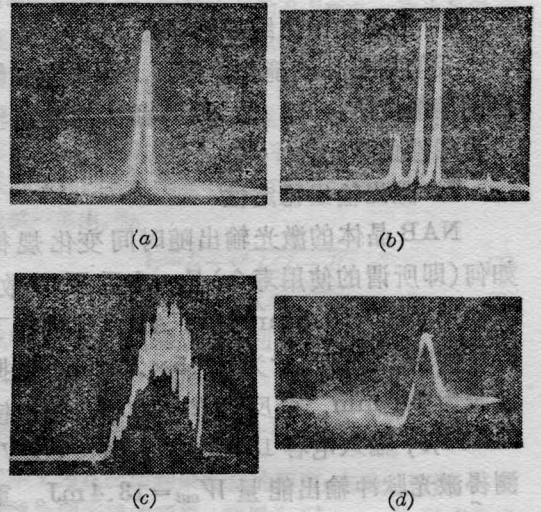


图3 NAB晶体激光脉冲输出波形

- (a) 激光阈值附近的单脉冲，扫描速率  $1 \mu\text{s}/\text{cm}$ ，脉宽  $300 \text{ ns}$ ；
- (b) 激光静态多脉冲波形，扫描速率  $10 \mu\text{s}/\text{cm}$ ；
- (c) 激光弛豫振荡波形，扫描速率  $10 \mu\text{s}/\text{cm}$ ；
- (d) 激光调Q单脉冲，扫描速率  $10 \text{ ns}/\text{cm}$ ，脉宽  $8 \text{ ns}$ 。

单脉冲输出偏低，这可能与晶体的荧光寿命较短(仅  $19 \mu\text{s}$ )有关。如能在晶体生长和器件实验中采取必要的技术措施，如在生长中掺  $\text{Cr}^{3+}$  以增加NAB荧光寿命或在实验中增大晶体吸收截面等，有可能进一步提高其单峰输出能量。

### 4. 激光输出波长

我们用平面光栅单色仪测量激光输出波长。单色仪用的是  $600 \text{ 条}/\text{mm}$  的平面光栅。闪烁波长为  $1.0 \mu\text{m}$ ，线色散为  $3.2 \text{ nm}/\text{mm}$ ，线宽为  $0.10 \text{ mm}$ 。用PIN硅光二极管接收。在室温下，测得NAB脉冲工作多模激光输出主峰波长为  $1.063 \mu\text{m}$ ，这与NAB荧光谱线的主峰很好符合。当用偏硼酸钡晶体作为倍频器进行倍频时，可以看到波长为  $531.5 \text{ nm}$  的绿色闪光。

### 5. 光束发散度

我们用透镜 ( $f=150 \text{ mm}$ ) 对输出的激光束进行聚焦，在感光记录纸上打出光斑的平均线径为  $\bar{D}=0.137 \text{ mm}$ ，由此算出光束的发散度  $\theta = D/f = 0.137/150 = 0.913 \text{ mrad}$ 。

## 6. 激光输出为线性偏振光

我们用格林棱镜作检偏器, 测出激光输出的偏振度  $P_a=1$ 。故 NAB 晶体的激光输出为线性偏振光。

## 7. 激光输出稳定性

NAB 晶体的激光输出随时间变化规律如何(即所谓的使用寿命)是一个重要参数。我们用  $\phi 1.9 \times 9.5 \text{mm}^3$  的 NAB 晶体进行了寿命实验。氙灯尺寸为  $\phi 2.5 \times 20 \text{mm}^3$ , 谐振腔长为 140 mm, 全反镜  $R=100\%$ , 输出镜  $T=50\%$ , 输入电容  $13 \mu\text{F}$ , 输入电压 850V, 测得激光脉冲输出能量  $W_{out}=13.4 \text{mJ}$ 。重复频率 45 次/小时, 连续实验 22 天, 共发射激光脉冲 23760 次, 未见激光衰减。这说明, NAB 的脉冲激光输出是相当稳定的。

## 四、结 论

实验结果表明, 我所研制的 NAB 晶体具有激光泵浦阈值低、增益大、效率高、输出线性偏振光、光束发散角小以及激光性能稳定等优点, 是一种优质的小型固体激光材料。以它做成的小型激光器件, 重量轻、体积小、成本低, 对国防、军工、工业、民用、教学和科研等领域都有实用价值。如能找到波长匹配

的高强度发光二极管或激光二极管泵浦, 则这种激光器在激光通讯、光纤传感和集成光学等方面也可能具有一定的适用性。

在 NAB 晶体的测试过程中, 得到西安五机部 205 所廉汝林、张小舟、郭慧敏等同志, 上海交通大学应用物理系方书淦、李胜华等老师, 江苏地质矿产局中心实验室赵炎生、阮雍生等同志的大力支持和帮助, 谨在此一并致以诚挚的谢意。

## 参 考 文 献

- [1] H. D. Hattendorff *et al.*; *J. Phys. C: Solid State Phys.*, 1977, **11**, 2399.
- [2] S. R. Chinn, H. Y-P Hong; *Opt. Commun.*, 1975, **15**, No. 3, 345.
- [3] G. Huber, H. G. Danielmeyer; *App'l. Phys.*, 1979, **18**, No. 1, 77.
- [4] Gerhard Winzer *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1978, **QE-14**, No. 11, 840.
- [5] V. L. Bilak *et al.*; *Sov. Phys. Dokl.*, 1978, **23**, No. 5, 199.
- [6] S. R. Chinn *et al.*; *Laser Focus*, 1976, **12**, No. 5, 64.
- [7] Walter Koechner; "Solid State Laser Engineering", Springer-Verlag, 1976, p. 74~122.
- [8] 纪钟;《激光》, 1981, **8**, No. 2, 26.
- [9] 王保林等;《硅酸盐学报》, 1984, **12**, No. 3, 259.
- [10] Luo Zundu *et al.*; *Chinese Physics Letters*, 1986, **3**, No. 11~12.

(上接第 523 页)

与忽略带电粒子自有场情况相比较, 增益表达式增加了二项(第一和第三项), 虽然(49)式的第三项的系数为负数(因  $\frac{(k_f - k_r)c}{\Delta\omega_{jr}^3} = \frac{1}{c^2(k_f - k_r)^2(\beta_z^0 - 1)^3} < 0$ ), 但是(49)式的第一项系数和第三项系数相比较, 并考虑实际情况中有  $cB_0 \gg E_{r0}$ 。则有

$$G_0 \left[ \frac{\gamma_s \Omega_0^2 \Omega_r^2 (k_0 + k_f) c}{\omega_0 \Delta\omega_{jr}^3} \left( \frac{2}{\omega_f} + \frac{1 - \beta_z^0}{\omega_0} \right) - \left| \frac{4\gamma_s \Omega_0^2 \Omega_r^2 (k_f - k_r) c}{\omega_f^2 \Delta\omega_{jr}^3} \right| \right] = \frac{e^4 E_{r0}^2 G_0}{\omega_f \gamma_s^3 m_0^4 c} \left[ \frac{B_0^2 (k_0 + k_f)}{\omega_0 \Delta\omega_{jr}^3} \right]$$

$$- \left| \frac{E_{or}^2 (k_f - k_r)}{\omega_f c^2 \Delta\omega_{jr}^3} \right| > 0. \quad (51)$$

(51)式说明, 所得增益比忽略自有场情况下激光器增益将有一定量的增加。

## 参 考 文 献

- [1] W. B. Colson; *Phys. Lett.*, 1977, **A64**, 190.
- [2] A. Yariv, C. Shih; *Opt. Commun.*, 1978, **24**, 233.
- [3] A. Bambini, A. Renieri; *Lett. Al NUOVO Cimento*, 1978, **21**, 399.
- [4] A. Bambini *et al.*; *Phys. Rev.*, 1979, **A19**, 2013.
- [5] W. H. Louisell *et al.*; *Phys. Rev.*, 1979, **A19**, 288.
- [6] C. Shih, A. Yariv; *Phys. Rev.*, 1980, **A22**, 2717.
- [7] 曹昌祺;“电动力学”, 人民教育出版社, 1962 年。
- [8] W. B. Colson; *Phys. of Quant. Electr.*, 1978, **5**, 157.