

新型微型激光器设计特点与性能研究*

王尔祺 黄元庆 宋德慧 叶艺文

(厦门大学新技术开发研究所, 福州)

林金谋

(莆田光学机电总厂, 福建)

摘要: 作者用新型晶体(NAB)研制了微型激光器(已获专利^[1])。对激光阈值、能量特性等进行了理论分析与计算,并与Nd:YAG、NdP₅O₁₄微型激光器作实验对比。结果表明NAB新型微型激光器有较低的激光阈值,较高的能量增益与转换效率。这种微型器件,有广泛的应用前景。文中还以获取高转换效率为目标,讨论了微型激光器的构造特点。

The design and characteristics of a new micro laser

Wang Erqi, Huang Yuanqing, Song Dehui, Yie Yiwen

(Xiamen University)

Lin Jinmou

(Fujian Putian Optical Mechano-Electronic Instrument General Works)

Abstract: A pulsed micro laser with a new working crystal NAB has been developed. Theoretical analyses and calculations on laser threshold value and energy characteristics etc., as well as, experimental tests have been carried out for comparison of the new NAB micro laser with the Nd:YAG and NdP₅O₁₄ micro lasers. Results show that NAB micro laser has lower threshold value, higher energy gain and transformation efficiency. It is expected to be widely used in various fields. The configuration of the device for attaining higher transfer efficiency have also been discussed.

* 本文为福建省自然科学基金资助项目 E86012 号“高转换效率低阈值激光器研究”论文。

一、概 述

硼酸铝钕 $[\text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4]$ (缩写NAB)晶体含有的钕离子浓度高达 $5.43 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$, 激光跃迁截面 $8.0 \times 10^{-19} \text{cm}^2$, 荧光淬灭效应极低, 具有高增益、低阈值性能, 加上不潮解、不解理、耐强酸强碱、硬度与Nd:YAG相当、光照(特别是紫外光照射)不易形成色心等良好的物化特性, 可能成为微型激光器的一种较好的激光晶体。作者用NAB晶体, 研制了新型微型激光器(如图1所示, 已获专利)。对 $\phi 3 \text{mm} \times 10.8 \text{mm}$ 的NAB棒, 用 $\phi 3 \text{mm} \times 30 \text{mm}$ 的脉冲氙灯泵浦, 在输入46J时, 获得660mJ静态激光能量输出, 转转效率为1.43%, 斜效率为1.47%。

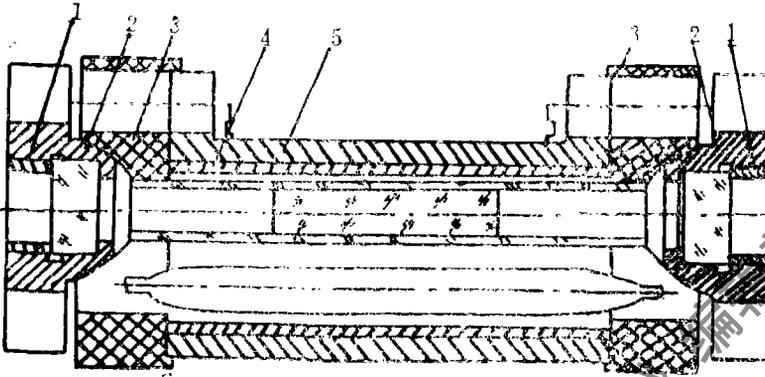


图1 微型脉冲固体激光器

为了进行性能比较, 作者又选用了性能优良的Nd:YAG与 $\text{NdP}_5\text{O}_{14}$ 两种材料制成微型激光器, 并做了大量的实验。

二、微型激光器的激光特性

1. 激光阈值

Nd:YAG、 $\text{NdP}_5\text{O}_{14}$ 与NAB晶体都是四能级结构。在室温下, Nd离子实现 $4F_3/2 \rightarrow 4I_{11/2}$ 的激光跃迁, 发射 $1.06 \mu\text{m}$ 波长的激光。当它以单脉冲形式运转时, 其激光泵浦阈值可按下式估算^[1]:

$$E = \frac{h\nu_0 A \delta}{\eta_{tot} \cdot \sigma_{32}}$$

式中, h 为普朗克常数 $6.626 \times 10^{-34} \text{Js}$; ν_0 为激光中心频率, A 为激光棒受激横截面积, δ 为系统单程总损耗, 它包括反射镜的吸收、散射、透射、谐振腔的衍射损耗, 晶体棒的吸收损耗, 谐振腔的调整误差损耗等; η_{tot} 为激光器总的转换效率, 它包括氙灯输入电能转换为光能的效率, 聚光腔把光能聚集到棒表面的聚光效率, 光能中晶体棒能有效吸收光谱区所占的能量比率, 有效吸收光谱区的能量实际被棒吸收的比率, 所吸收的能量转换为 $1.06 \mu\text{m}$ 光子数的比率(即量子效率), 以及腔内单位时间内产生的 $1.06 \mu\text{m}$ 激光光能输出腔外的那部分比率; σ_{32} 为激光跃迁截面。

对NAB微型激光器件 $\sigma_{32} = 8.0 \times 10^{-19} \text{cm}^2$, 当采用反射镜透射率 $T = 64\%$, 若除此之外, 激光渡越谐振腔的其它单程损耗总的为 4% , $\eta_{tot} = 2.5\%$, 泵浦光在晶体中的穿透深度以

0.1mm计算（此时A为环状受激横截面），则

$$E = 57.5 \text{ mJ}$$

用存储示波器观察单脉冲激光阈值波形，测定泵浦阈值。在修正灯、棒、聚光腔等之间的不匹配因素后，其激光泵浦阈值为60.4mJ。同时，在同等条件下，测得晶体尺寸为 $\phi 2.5 \text{ mm} \times 9.23 \text{ mm}$ ， $\phi 1.9 \text{ mm} \times 8.4 \text{ mm}$ 的激光器的激光泵浦阈值，均在此值附近。

NAB、Nd:YAG与NdP₅O₁₄微型激光器的激光泵浦阈值的理论估算与实验数据列于表1。从这些数据可知，NAB微型器件的激光阈值较低。这主要是因为其含钕离子浓度较高、激光跃迁截面大，且泵浦光只要穿透激光晶体表面层50~100 μm 深，便能产生激光的缘故。

表1

| 荧光器件 | NAB | Nd:YAG | NdP ₅ O ₁₄ |
|--------------------|--|--|--|
| 晶体尺寸 | $\phi 3 \text{ mm} \times 10.8 \text{ mm}$ | $\phi 3 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ | $\phi 3 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ |
| 含钕浓度 | $5.43 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ | $1.39 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ | $3.96 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ |
| 荧光寿命 | 20~50 μs | 230 μs | 120 μs |
| 激光跃迁截面 | $8.0 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ | $8.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ | $1.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ |
| 激光理论 泵浦 阈值实验 | 57.5mJ 60.4mJ | 2316mJ 2510mJ | 1024mJ 1210mJ |
| 输入5J时激光输出 | 52.1mJ | 11mJ | 170mJ |
| 效率 | 1.04% | 0.22% | 3.4% |
| 斜率 | 1.47% | 0.9% | 4.3% |

注：（1）1989年国内已有输入2J，输出13mJ的实验成果，（2）1989年上海光机所微型激光器系列研制报告表明：YAG器件阈值分布在2~4.56J之间，动态输出效率分布在0.12%~0.33%之间（一般静态效率会高3倍）。因此，本文提供的实验数据，并非最高实用水平，仅供读者参考。

2. 激光能量特性

小信号增益系数 g_0 或小信号增益 G_0 是决定激光器特征的重要参数之一，它们与激光器的输入能量 E_{i_0} 有如下简单关系：

$$\ln G_0 = g_0 l = K E_{i_0}$$

即

$$G_0 = e^{g_0 l} = e^{K E_{i_0}} \text{ 或 } G_0^K = 10 \times \log G_0 \text{ (dB)}$$

式中， l 为晶体棒长， K 为晶体的泵浦系数， K 值可由下式求出：

$$K = \frac{\ln(R_1' / R_1'')}{2(E_{p_1}' - E_{p_1}'')}$$

式中， R_1' 、 R_1'' 分别为两只不同输出镜的反射率， E_{p_1}' 、 E_{p_1}'' 分别为达到激光阈值时氙灯

的输入能量 $E_{p,t}$ 。对于NAB微型激光器当选用两只不同反射率 $R_1' = 36\%$ 与 $R_1'' = 50\%$ 的输出镜, 测出 $E_{p,t}$ 值分别为60.4mJ与30.4mJ, 从而求得 $K = 0.548$ 。根据 K 值, 绘出长度 $l = 10.8\text{mm}$ 晶体棒的NAB微型激光器的小信号增益 G_0 及增益系数 g_0 与灯的输入能量 E_{IN} 的函数关系, 如图2所示。Nd:YAG与NdP₅O₁₄两种微型激光器的小信号增益及增益系数与灯的输入能量的函数关系也表示在图2上。

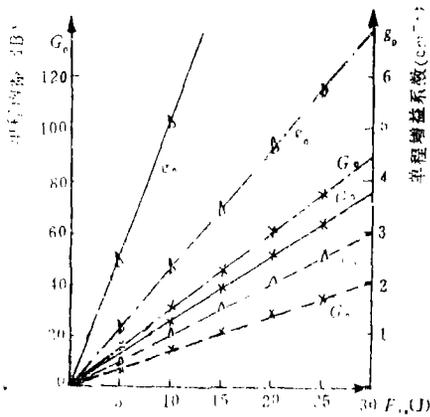


图2 三种微型激光器单程增益、增益系数与泵浦灯输入能量的函数关系

实线——为 $\phi 3\text{mm} \times 10.8\text{mm}$ NAB棒
 点划线- - -为 $\phi 3\text{mm} \times 30\text{mm}$ NdP₅O₁₄棒
 虚线----为 $\phi 3\text{mm} \times 30\text{mm}$ Nd:YAG棒

与Nd:YAG及NdP₅O₁₄微型激光器相比, NAB微型激光器有较好的能量增益, 其增益比Nd:YAG高, 而比NdP₅O₁₄低。增益比Nd:YAG高, 是因NAB含钕浓度比它高出一个数量级, 而比NdP₅O₁₄低, 是因为这二者含钕浓度相当, 但NAB荧光寿命较短, 泵浦光仅能穿透晶体浅表面, 不利于能量的存储。为便于比较, 在前述表1中也列出了输入能量为5J时, 三种微型激光器的输出能量及转换效率的典型数值。从表中所列数字可得到同样的结论。

3. 光束发散角

三种微型激光器均采用平行平面腔结构, 其束腰 ω_0 位在谐振腔的输出镜上。

把一个焦距 $F = 100\text{mm}$ 的会聚透镜放置在远离谐振腔输出镜处(即会聚透镜与束腰 ω_0 之间的距离 $l \gg F$), 并在象方焦平面 F' 处放置一块感光相纸。打激光后, 测出相纸上的焦斑 $\omega_{F'}$ 按下式^[3]算得:

三种微型激光器的激光输出能量与输入能量的关系曲线如图3所示。图中NAB微型激光器是用 $\phi 3\text{mm} \times 30\text{mm}$ 脉冲氙灯泵浦 $\phi 3\text{mm} \times 10.8\text{mm}$ 晶体, 其输出镜透过率为 $T = 64\%$ 。当输入能量为46J时, 一个长脉冲输出能量高达660mJ(用中科院物理所生产的LPE-1A型激光功率能量计测量), 其转换效率为1.43%, 斜效率为1.47%, 静态脉宽约为300ns(用466型存储示波器测量)。从该图曲线及实验过程中发现, 输出660mJ并非最大值, 若增大输入能量, 输出能量仍有继续增大的趋势。调整C、V组合, 适当增加电容量C, 在相同的输入能量下, 能获得较高的能量输出。实验结果表明, 电容量取145 μF 为宜。由于实验受氙灯破坏阈值的限制, 没有再增大输入能量, 寻找器件输出能量的最大值。

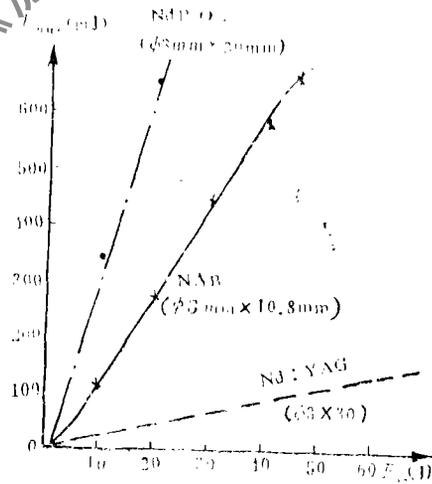


图3 激光输出能量与泵浦灯输入能量的关系

光束远场发散角

$$\theta_0 = \frac{F}{2\omega_F'}$$

实测结果, NAB微型激光器的发散角为0.83mrad, Nd:YAG与NdP₅O₁₄发散角分别为1mrad与4.5mrad。这说明微型NAB激光器的光束准直度相当好。

4. 激光输出为线偏振光

将装在刻度盘上的格林棱镜作为检偏器, 置于激光输出光路中。旋转格林棱镜, 使激光输出获得最大值 P , 然后再旋转刻度盘, 当格林棱镜转动90°时, 激光输出变到最小值 $P_{\perp} \rightarrow 0$ 。当格林棱镜再继续旋转90°时, 激光输出又恢复到最大值。接着再将格林棱镜旋转90°, 激光输出又恢复到零。经如此循环反复测试, 并根据激光束对偏振器的偏振度 P_d 的关系式

$$P_d = \frac{P_{\parallel} - P_{\perp}}{P_{\parallel} + P_{\perp}}$$

推算得激光束的偏振度 $P_d = 1$, 这表明NAB晶体产生的激光为线偏振光。

实验是用圆柱形NAB晶体棒、平行平面腔激光器完成的, 这说明NAB晶体无需磨成布鲁斯特角, 便能获得线偏振光。

三、激光器结构特点

1. 聚光器结构及其聚光效率

激光器的谐振腔长30mm, 聚光器为椭圆柱腔, 长轴 $2a = 10\text{mm}$, 偏心率 $e = 0.5$ 。图4为该聚光器的横截面示意图, P_0 点为氙灯经椭圆形成的象恰好能充满整个激光棒的直径的点(如图4所示)。

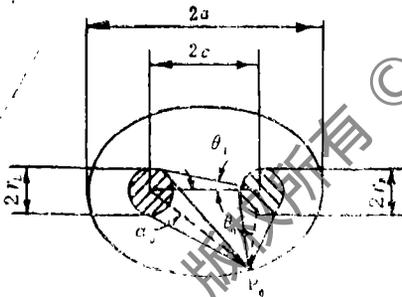


图4 椭圆柱聚光器横截面图

从脉冲氙灯辐射的泵浦光能, 照射在激光晶体棒表面的耦合效率, 可简单地认为:

$$\eta = \eta_{ge} \times \eta_{op}$$

式中, η_{ge} 为聚光器的几何传递系数, 即氙灯发出的光能中直接射到和经壁反射到激光棒上的能量与灯发出的总能量之比, η_{op} 为聚光器的光学效率:

$$\eta_{op} = \gamma_w (1 - \gamma_R) (1 - a) (1 - f)$$

式中, γ_w 为腔壁在泵浦带的反射率(约为100%), γ_R 为激光棒表面和玻璃套表面的反射损耗(约为8%), a 为氙灯和激光棒之间的光学介质中的吸收损耗(约为1%), f 为腔的非反射面积与总的内表面积之比(约为3%), 估算求得:

$$\eta_{op} = 88\%$$

从图4可得出聚光器的几何转换效率 η_{ge} 为:

$$\eta_{ge} = \frac{1}{\pi} (\alpha_0 \times \frac{\gamma_R}{\gamma_L}) \theta_0$$

式中, $\alpha_0 = \arccos \frac{1}{e} [1 - \frac{1-e^2}{2} (1 + \frac{\gamma_R}{\gamma_L})]$

$$\theta_0 = \arcsin\left(\frac{\gamma_L}{\gamma_R} \sin \alpha_0\right)$$

计算结果表示于图5中。

从该图中可看出, 当 $e=0.5$, $\gamma_R/\gamma_L=1$ 时, $\eta_{ps}=68\%$

故 $\eta = \eta_{ps} \times \eta_{op} = 88\% \times 68\% = 60\%$

实验结果与这理论耦合效率相符合。

从该图还可知, 要获得高的转换效率, 原则上要取大的 γ_R/γ_L 值, 但考虑灯的寿命, 一般宜取比值为1, 同时考虑到泵浦光在腔内存在多次反射及腔内表面反射率不可能为100%, 故本器件偏心率取值为0.5。

2. 器件设计特点

在器件的整体设计上, 考虑到通用性以及加工、装调简便, 本器件仅由五种机械零件装配而成, 并将激光器的输出设计成中心发射型式。同时, 所有的电极引线均从全反射一端引出。

四、结 论

通过理论分析与实验验证, 初步认为: 三种微型激光器中, NAB激光器具有增益高、阈值低、输出线偏振光、光束发散角小、体积小、重量轻、晶体价格低廉等优点。因此, 它在工业、医学、军事、通讯等方面将有广泛应用前景。NdP₂O₇激光器虽然比NAB激光器增益大、效率高, 但因该晶体存在截理、铁洋畴、光学质量较差等问题。因此, NAB激光器在微型化以及大的能量输出方面是占优势的。但由于其发光寿命短, 在激光动态输出方面不如YAG。

本文为省、市科委资助的课题研究论文, 对省、市的支持以及罗遵度、邱闽旺与黄奕川等同志的帮助, 表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- [1] 周炳琨等, 《激光原理》, 国防工业出版社, 1980年。
- [2] Walter Koechner, Solid State Laser Engineering, Springer-Verlag, 1976, P.74~122.
- [3] 吕百达, 《激光光学》, 四川大学出版社出版, 1986年。
- [4] 廉汝林, 微小型五磷酸铈脉冲激光器, 《兵器工业部205所论文集》, 1982年, 第149页。
- [5] 王尔琪等, 微型脉冲固体激光器(通用型), 实用新型专利(专利号88 2 20213.8), 1989年7月12日。
- [6] 上海光机所, 微型激光器系列研制报告, 1989年。

* * *

作者简介: 王尔琪, 男, 1938年1月出生。高级工程师, 副所长。现从事激光

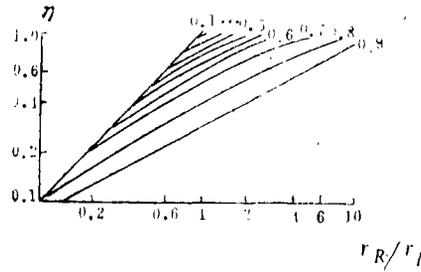


图5 聚光器的几何转换效率与比值 γ_R/γ_L 和偏心率 e 的关系

工程精度理论研究。

宋德慧，女，1939年2月出生。高级工程师。现从事光学测试技术与仪器设计。

林金谋，男，1950年12月出生。高级工程师，厂长。现从事光学仪器设计。

黄元庆，男，1949年2月出生。工程师。从事激光技术。

叶艺文，男，1956年12月出生。讲师。从事电子技术。

收稿日期：1989年12月27日。

· 简 讯 ·

风冷重复频率激光测距机等五项成果通过专家鉴定

机电部兵器科学研究院于1989年12月15日在成都主持召开了鉴定会，对西南技术物理研究所研制的风冷重复频率激光测距机、激光功率测试技术研究、微机电视编辑制作系统、MCTVS-Ⅱ微机多功能电视监视与报警系统和JY型CO₂激光医疗机五个项目进行了技术鉴定。专家们听取了各个项目的研制技术总结报告、测试报告和使用报告，并经过认真的评议，认为五个项目均全面达到技术指标要求，一致通过专家鉴定。

风冷重复频率激光测距机 采用常压强迫风冷系统及被动式BDN染料调Q，重复频率10pps。该机设计合理，可维修性好，已成功地用于国家重点装备项目，其综合性能指标与意大利同类产品GAQ-4型风冷激光测距机相当，达到80年代中期国际先进水平，在国内处于领先地位。

激光功率测试技术研究 具有直接以稳定的He-Ne激光器为辐射源的特点，配以空腔型绝对辐射计，可更好的适用于0.4 μ m~1.1 μ m波长的激光功率的检定需要。该装置各项指标达到国家检定系统所规定激光功率一级工作标准的要求，在0.633 μ m和1.06 μ m波长上测量激光功率不确定度 $\sigma < 1\%$ 。He-Ne激光源的不稳定度优于0.05%，达到了国内最好水平，CW-YAG激光源的不稳定度优于0.3%，属国内领先水平。

微机电视编辑制作系统 是一个多功能的电视节目制作系统，集录象磁带编辑、录象资料存贮/检索、管理、电视字幕制作于一体。其编辑功能除包括日本Sony公司RM-440编辑控制器的全部功能外，还具有多点自动编辑和绝对地址系统。编辑时可逐帧搜索，不仅提高了编辑精度，且可用于存贮彩色图象文字资料。存贮容量大、检索方便、成本低廉。

MCTVS-Ⅱ微机多功能电视监视与报警系统 在设计中运用微电脑实现分布式控制，人机交互通讯，远距离云台编码/解码传输控制。它将电视监视、语音监听、报警处理、云台遥控、通讯联络、现场声象记录统一到中心控制台管理之下，综合性强，工作稳定可靠，可实现昼夜及全天候工作。

JY型CO₂激光医疗机 是一种用途广泛的中小功率激光医疗设备，其特点是：关节臂灵活，光传输损耗小，导光准确；输出功率从0~15W连续可调，输出功率稳定，复现性好，并设有治疗和理疗转换开关，可一机多用。安全措施完备，使用方便。该机经四川省人民医院、崇庆县骨伤矫形外科医院等20多家医院临床应用证明其技术性能满足临床应用要求，效果良好。

(周朝明 供稿)