

固体激光材料与激光器的发展及应用

西华师范大学物理与电子信息学院

摘要: 近年来 $2\mu\text{m}$ 波段室温运行的固体激光器由于在医学、光通讯、激光雷达等方面的重要的应用前景而引起学术界和商业界的广泛关注。本文详细介绍了 $2\mu\text{m}$ 波段固体激光材料及激光器的发展状况, 阐述了医用 Cr,Tm,Ho:YAG 激光器的技术特点, 最后提出了应用 $2\mu\text{m}$ 波段固体激光材料研制大功率激光器的新思路, 为同类激光器的研究与应用提供了有利参考, 具有一定的指导意义。

关键词: Cr,Tm,Ho:YAG $2\mu\text{m}$ 波段 钛激光治疗机 激光医疗

1、前言

与气体激光器相比, 半导体泵浦固体激光器具有体积小、重量轻、供电简单、结构紧凑、便于携带、便于维护和操作等优点。现在已用作手术治疗、肌肉组织焊接、牙科治疗、光镇痛和光针灸等领域。 $2\mu\text{m}$ 波段恰恰处于水分子的吸收峰, 输出波长为 $2\mu\text{m}$ 的固体激光器是激光手术的最佳波长。与通常的 Nd:YAG 激光($1.064\mu\text{m}$)相比, 人体对 $2\mu\text{m}$ 激光的吸收效果更好, 激光切割能力大大提高, 尤其对敏感组织, 如肝、胃、结肠等软组织的烧蚀利切割效果更加理想。此外石英光纤还可以传播 $2\mu\text{m}$ 激光, 这使得激光传导更加容易。目前半导体激光器泵浦的 Ho : YLF $2.12\mu\text{m}$ 激光器已做成结构紧凑、维护容易、便携式的医用器械。虽然 $2\mu\text{m}$ 激光器有着如此广泛而重要的应用前景, 并且在相应领域已经得到了大范围的应用, 但是对于二极管泵浦 $2\mu\text{m}$ 固体激光器深入的研究并不是伴随着激光器的产生而开始的, 其间经历了漫长的过程。

2、国外 $2\mu\text{m}$ 波段固体激光材料及激光器的发展状况

(1) Ho:YAG 激光器

1965 年 Bell 实验室 Johnson 等人首先报道了 Ho:YAG 在液氮温度下实现振荡[1], 使用的晶体用熔盐法生长, 晶体长度 25mm, 输出三种不同的激光波长。输出波长 $2.0975\mu\text{m}$ 时, 脉冲阈值为 44J; 输出波长 $2.0914\mu\text{m}$ 时, 脉冲阈值为 1760J; 输出波长 $2.1223\mu\text{m}$ 时, 脉冲阈值为 410J。高阈值限制了 Ho:YAG 的应用。

(2) Er,Tm,Ho:YAG 激光器

Ho:YAG 激光器泵浦效率低是由于 Ho^{3+} 在 YAG 中只有几条弱吸收线。为了增加对灯泵能量的吸收, 1966 年 Johnson 等人采用 Er^{3+} 和 Tm^{3+} 来敏化 Ho^{3+} , 由于它们吸收和传递泵浦能量, 液氮温度下得到了 5% 的闪光灯泵浦效率和 15W 的连续激光输出[2]。1975 年, Beck 等人报道了直径 4mm, 长度 70mm 的晶体在液氮温度下连续输出 50W, 斜率效率 6.5%, 使用钨卤素灯作泵浦源[3]。1981 年 Barnes 等人在液氮温度下实现了脉冲激光振荡和放大, TEM00 模输出 112mJ, 斜率效率 1.2%, 放大输出 235mJ。晶体直径 4mm, 长度 56mm, 晶体中 Ho^{3+} 、 Tm^{3+} 、 Er^{3+} 和 Y^{3+} 分别占 0.021、0.037、0.616 和 0.326[4]。

(3) Tm,Ho:YAG 激光器

1987 年 Fan 等人报道了用波长为 781.5 二极管激光器泵浦 Tm,Ho:YAG 获得室温连续输出, 阈值 4.4mW, 斜率效率 19%, 输出波长 $2.074\mu\text{m}$ [5]。1990 年 Stoneman 等人实现了 Tm,Ho:YAG 在 2.09~2.12 范围连续可调谐激光输出。晶体用引上法生长, Tm^{3+} 和 Ho^{3+} 的含量分别为 $8.3 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 和 $6.9 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 。

(4) Cr,Tm,Ho:YSGG 激光器

1986 年 Alpatov 研制出 Cr,Tm,Ho:YSGG (钇钪石榴石) 激光晶体, 并获得室温灯泵浦脉冲输出能量 7.4J, 斜率效率 3.1%, 输出波长 $2.088\mu\text{m}$, 并于 1988 年实现开关运行[6]。其中晶体直径 4mm, 长度 76mm, 晶体中 Cr³⁺、Tm³⁺、Ho³⁺的含量分别为 $2.5\times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 、 $8\times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 、 $5\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 。在室温下获得 80mJ 的电光调输出, 此时的泵浦输入为 125J, 调阈值为 60J。在转镜调时, 获得 280mJ 的多峰光脉冲, 500 的总宽度, 脉冲中含 5~6 个峰, 峰-峰间隔 $2\mu\text{m}$, 每个峰半宽度为 40~50。

(5) Cr,Tm,Ho:YAG 激光器

1988 年 ST Systems 公司的 Mark E.Storm 采用单椭圆腔,Cr³⁺、Tm³⁺、Ho³⁺浓度分别为 2.7at%、5.8at%、0.36at%。晶体直径 5mm, 长度 53mm。闪光灯内径 4mm, 闪光灯弧长 50mm, 闪光灯脉宽 600us, 全反镜曲率半径 10m, 输出镜透过率 85%。在温度 295K 时, 激光阈值 25J, 斜率效率 2.3%[7]。

1989 年美国海军研究实验室的 G.J.Quarles 等人采用 67mm 镀银椭圆腔和 69mm 漫反射腔, 晶体直径 5mm, 长度 76.2mm, Cr³⁺、Tm³⁺、Ho³⁺浓度分别为 $7.7\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 、 $8.0\times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 、 $5.0\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$, 氙灯充气压 630Torr, 闪光灯内径 4mm, 闪光灯弧长 63.5mm, 闪光灯脉宽 540us, 谐振腔长度为 300mm, 全反镜曲率半径为 1m, 输出镜透过率小于 75%, 输出波长为 $2.097\mu\text{m}$ 。使用漫反腔得到了 4.7%斜效率, 阈值 70J。使用镀银腔得到了 5.1%斜效率, 阈值 38J[8]。同时从理论和实验上证明了 YAG 是 Cr,Tm,Ho:YAG 最好基质,Cr³⁺→Tm³⁺能量传递效率 YAG 高于 YSAG 和 YSGG。

1990 年 T.Becker 等人报道了 Cr,Tm,Ho:YAG 激光器重频 30Hz 时的输出特性。Cr³⁺、Tm³⁺、Ho³⁺浓度分别为 2at%、5at%和 0.5at%。晶体直径分别为 2.8mm、4mm 和 5mm, 晶体长度为 56mm, 谐振腔腔长 300mm, 全反镜半径 1m, 输出镜透过率 15%。闪光灯内径为 4mm, 弧长 76mm, 放电脉宽 500 μm 。在 20oC 时, 直径 2.8mm 晶体的效率比其它两种高, 在重频 21Hz 时, 斜效率 1.6%, 同时获得了 6.5W 的输出; 在重频 30Hz 时, 得到 2W 输出。

1991 年美国海军研究实验室采用单椭圆镀银腔, 晶体直径 5mm, 长度 67mm, Cr³⁺、Tm³⁺、Ho³⁺浓度分别为 0.8at%、6.0at%、0.4at%, 氙灯充气压 450Torr, 闪光灯内径 5mm, 闪光灯弧长 63mm, 闪光灯脉宽 290 μs , 谐振腔长度为 290mm, 全反镜曲率半径为 0.5m, 输出镜透过率 20%, 水温 20oC, 重频 1Hz 时, 得到最佳斜率效率。同时, 研究了调的特性, 发现开关的 Cr,Tm,Ho:YAG 效率几乎比长脉冲 Cr,Tm,Ho:YAG 低一个数量级, 得到了 $2.121\mu\text{m}$ 增益系数为 0.07cm^{-1} , 估计调在 $2.121\mu\text{m}$ 的增益系数为 $0.02\sim 0.07\text{cm}^{-1}$ [9]。

1994 年 W.Zendzian 等人报道了闪光灯泵浦的 Cr,Tm,Ho:YAG 激光器。注入能量 110J 时, 得到了 17W 的输出, 斜效率为 2%, 同时从理论和实验上验证了热焦距对 M2 参数的影响[10]。

1998 年 Yoichi 等人报道了在温度 10oC, 泵浦能量密度 $85.9\text{J}/\text{cm}^3$, 得到了 Cr,Tm:YAG 和 Cr,Tm,Ho:YAG 的最大小信号增益系数分别为 0.144cm^{-1} 和 0.234cm^{-1} [11]。

2000 年 Cheng Li 等人报道了采用闪光灯泵浦 Cr,Tm,Ho:YAG 晶体, 在自由运转模式下, 室温获得了 4.5J 的激光输出, 输出波长 $2.098\mu\text{m}$, 斜率效率 2.7%, 阈值能量 95J; 在声光调方式下, 室温下单模输出大于 530mJ, 脉冲宽度 165ns。晶体直径为 4mm, 长度 100mm, 晶体中 Cr³⁺、Tm³⁺、Ho³⁺的含量分别为 1.2at%、6.1at%、0.4at%[12]。

在医用钬激光器的研究开发方面, 美国相干公司等单位居领先地位, 1990 年向用户提供了第一台医用钬激光治疗机, 如今已开发出平均功率为 20W、60W 和 100W 三种单波长型号, 相应重复频率分别为 5—20Hz、5-40Hz 和 5-50Hz, 相应单脉冲能量分别为 0.5-2.5J、0.2-3.5J 和 0.2-3.5J, 相应的平均功率设置分别为 2J/10Hz、1.5J/40Hz 和 2J/50Hz, 脉冲持续时间为 500 μs 。此外, 还有 80/100W 的双波长 Holmium&Nd:YAG 激光器, 重复频率为 5-40Hz, 单脉冲能量为 0.2-3.5J, 相应的平均功率设置为 2J/40Hz, 脉冲持续时间为

500 μ s。这些构成了 Versa Pulse PowerSuiteTM 系列钛激光器。

美国 Trimeddyne 公司开发的钛激光治疗机, 平均功率有 30W 和 80W 两种。对于 30W 的钛激光治疗机, 单脉冲能量为 0.2-3.5J, 重复频率为 5-20Hz, 脉冲持续时间为 350 μ s。而 80W 钛激光治疗机采用独特的双脉冲技术, 能够传递更多的能量到硬组织, 同时尽量减少对周围软组织的损伤。其单脉冲能量为 0.2-3.5J, 重复频率为 5-60Hz, 双脉冲模式下, 单脉冲有效能量为 0.4-7J, 重复频率为 3-30Hz, 脉冲持续时间为 350 μ s。

3、国内 2 μ m 波段固体激光材料及激光器的发展状况

1991 年起电子部 11 所展开了钛激光晶体研究工作。采用感应加热提拉法生长 Cr,Tm,Ho:YAG 晶体, 解决了高效率 Cr³⁺→Tm³⁺→Ho³⁺能量转移和高光学质量晶体生长工艺等一系列关键技术。激光棒主要技术指标达到: 干涉条纹 0.3 条/25mm, 无散射颗粒, 单脉冲输出能量 2.3J。

1995 年华中理工大学的叶洪波等人研制出了在室温下 Ho:YAG 激光器输出的能量 3J。实验中所用到的泵浦方式为脉冲氙灯泵浦, 聚光腔是镀银单椭圆腔, 冷却方式为对冷却水进行恒温控制, 其温度浮动范围为 10±5 $^{\circ}$ C。实验采用国产棒尺寸为 $\phi 5 \times 93$ mm, 谐振腔为平凹腔, 腔长 280mm。全反镜为曲面镜, 曲率为 1m。输出镜为平面镜, 在输出镜透过率为 29%, 冷却温度为 9 $^{\circ}$ C, 放电脉冲半宽度为 360 μ s, 激光器阈值为 98.4J, 单脉冲输出在 3J 以上。

1997 年中国计量学院光电子研究所的黄莉蕾等人, 使用国产品体 Cr³⁺ (2.3×10²⁰cm⁻³), Tm³⁺ (8.2×10²⁰cm⁻³), Ho³⁺ (5.4×10²⁰cm⁻³):YAG。尺寸为 $\phi 6 \times 100$ mm, 采用单灯相交圆柱聚光腔, 内壁贴 Ag 箔抛光。谐振腔为平凹腔, 输出镜曲率半径为 5m, 透过率为 25%, 全反镜对 2.1 μ m 激光反射率大于 98%。用气压为 2×10⁵Pa 的氙灯泵浦, 频率 1Hz, 冷却水温 18~22 $^{\circ}$ C, 激光阈值为 73~84J, 获得斜率效率为 2~4%, 单脉冲能量为 0.8~1.4J [13]。

1997 年, 安徽光机所的陈长水等人进行了开关 Cr,Tm,Ho:YAG 激光器的实验研究, 获得了单脉冲能量 60mJ 的 2.1 μ m 的稳定调激光输出, 通过倍频途径测得了其倍频光 (1.05 μ m) 的脉冲半宽度 35ns [14]。

安徽光机所鲁士平课题组研制的 HJZ-1-10 型钛激光治疗机于 1997 年 12 月在杭州通过了国家医药管理局用光学、激光、冷疗设备质量检测中心的新产品注册检测。经过高温 55 $^{\circ}$ C、低温 -40 $^{\circ}$ C、湿度 93% 以及电绝缘强度等多种环境实验的严格检测, 两台医用钛激光器所达到的指标为: 脉冲重复频率为 4~10Hz 分档可调, 输出平均功率为 14W 左右, 输出功率的不稳定度为 ±2.0%, 传输光纤的耦合效率大于 65%。目前, 这两台钛激光治疗机正在医院里进行临床应用研究 [15]。

如上所述, 目前国内的钛激光治疗机, 输出平均功率 14W 左右, 远远低于国外水平, 不能满足医学临床治疗要求。

4、医用 Cr,Tm,Ho:YAG 激光器的特点

人体组织中水的比例大约占 70%, 因而组织对光的吸收情况与水相似。水在中红外波段有两个强的吸收谱带, 分别为 2.5~4.0 μ m 和 5.6~10 μ m。因此, 当激光与人体组织相互作用时, 水对所用激光吸收系数的大小就决定了激光在组织中的穿透深度、损伤区域以及手术精度等。水对于不同波长激光的吸收系数示意图如图 1 所示。

图 1 水对于不同波长光的吸收系数示意图

Nd:YAG 激光器的波长为 1.06 μ m, 可以用石英光纤传输, 在医疗方面有不少应用。但是, 由于水对它的吸收仅为 0.1cm⁻¹, 在有些外科手术中, 它的穿透深度较深, 损伤区域较大,

手术精度不高，因此不宜使用。Er:YAG 激光波长为 $2.94\mu\text{m}$ ，水对它的吸收为 3000cm^{-1} ，属水的强吸收波段。对医疗应用来说，铒激光器是一个十分理想的光源，然而令人遗憾的是：铒激光不能用石英光纤传输，能够传输铒激光的非石英光纤容易断裂，妨碍其临床应用。Ho:YAG 激光波长为 $2.1\mu\text{m}$ ，位于水较强吸收谱线。水对其吸收约为 25cm^{-1} ，是水对 Nd:YAG 激光吸收的 250 倍。显然，水对 Ho:YAG 激光的强吸收使其可以在大部分软组织和硬组织中产生浅的穿透深度、高的手术精度和独特的凝血作用，大大限制了损伤区域。在未来几年中，它将逐步取代 Nd:YAG 激光器。虽然水对钬激光的吸收只是水对铒激光吸收的一百二十分之一，然而钬激光能用低 OH-的石英光纤传输，这就使钬激光能有效地工作在气体和液体环境中，为医生切除软骨和其它硬组织提供精确的途径，使钬激光成为现有激光内窥镜系统中最适宜的光源[37]。钬激光在软组织中的外科手术精度与 CO₂ 激光相比较，可能略低于 CO₂ 激光的手术精度，然而它能为大部分组织提供更好的凝血功能。除此之外，二者之间的最大区别是 CO₂ 激光不能用石英光纤传输，只能借助于笨重的关节臂来导光，十分不便；而能用光纤传输的脉冲钬激光则是切除和烧蚀软骨以及其它硬的钙化的组织的有效工具。因此有人称钬激光对于 CO₂ 激光来说具有挑战性，在某些手术中钬激光具有取代 CO₂ 激光的潜力。

表 1 所示为实验得出的人体组织对于不同波长光的吸收系数。由于人体其它部分组织也都含有大量的水分，由此可以推出，人体组织对 $2.1\mu\text{m}$ 的钬激光均有强烈的吸收作用，这一特点使得钬激光器在医学上有着广阔的应用前景。

表 1 皮肤组织对不同波长光的吸收系数

5、大功率钬激光器技术方案的提出

根据上述钬激光器在医疗中的具体应用，我们提出了一种实现大功率输出的灯泵钬激光器实用化方案：对单路电源的放电信号进行分频处理，在软硬件上实现单路电源改造成具有多条放电回路并且轮流等时间间隔工作的多路电源，最终实现一台电源供两路或四路 Cr,Tm,Ho:YAG 激光器轮流等时间间隔工作的设想。在水温 0℃，单脉冲注入能量 100J，重频 20Hz 时，双路 Cr,Tm,Ho:YAG 激光器直接输出功率有望突破 35W，合光路后光纤末端输出功率 25W。该设计方案为同类激光器的研究与应用提供了有利参考，具有一定的指导意义。

参考文献

- [1]L.F.Johnson , J.E.Geuis , L.G.Van Uitert , et.al.Coherent oscillations from Tm³⁺,Ho³⁺,Yb³⁺ and Er³⁺ ions in yttrium aluminum garnet. Applied Physics Letters.1965, 7(5): 127~129
- [2]L.F.Johnson, J.E.Geusic, L.G.VanUitert et al. Efficient high-power coherent emission from Ho³⁺ ions in yttrium aluminum garnet assisted by energy transfer.Applied Physics Letters, 1966, 8(8): 200~202
- [3]R.Beck,K.Gurs. Ho laser with 50W output and 6.5% slope efficiency.Journal of applied physics, 1975, 46(12): 5224~5225
- [4]Norman P.Barnes, D.J.Gettemy.Pulsed Ho:YAG oscillator and amplifier. IEEE Journal of Quantum Electron, 1981, 17: 1303~1304
- [5]T.Y.Fan,R.L.Byer et al. Continuous wave operation at $2.1\mu\text{m}$ of a diode-laser-pumped, Ho:YAG laser at 300.Optics letters., 1987, 12: 678~680