

利用 Nd:YAG 激光晶体的瞬态吸收 研究其有效的滤光材料

叶碧青 查贵根 马忠林

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

在紫外光辐照下, Nd:YAG 晶体的瞬态色心的出现, 引起激光波长上明显的瞬态吸收。本文利用这个现象, 研究了滤光材料的紫外滤光性能。采用组合 Nd:YAG 连续激光系统, 可以有效地选择激光器中适用的滤光材料。此外, 我们得到了组合激光系统中不同棒的阈值泵浦功率相互依赖关系的公式, 与 K. Mori 的公式相比, 我们给出了含有各个系数的定量表达式。

一

Nd:YAG 晶体在其生长和退火过程中, 以及在紫外光的辐照下, 都会出现色心, 形成附加的吸收带。大多数色心在室温下不会自动地消失, 这种色心就是所谓稳态色心。然而, 晶体中还存在着另一种室温下的短寿命色心, 即瞬态色心。1968年 J. B. Willis 和 M. Dixon^[1] 发现, 用 3000 Å 光辐照 Nd:YAG 晶体时, 除产生室温下稳定的 3300 Å 吸收带外, 在 6250 Å 处还有一条寿命为 1 秒的吸收带。1973年 K. Mori^[2] 利用组合 Nd:YAG 脉冲激光器, 研究了 Nd:YAG 晶体中因紫外光辐照而引起的瞬态色心, 观察到在激光波长上出现明显的瞬态吸收。1977年 K. Mori^[3] 通过更精密的实验, 解释了他本人在 1973年所观察到的现象, 提出了负离子空穴俘获电子的 E_1 、 E_2 、 E_3 带模型, 认为 E_1 、 E_2 、 E_3 带延伸至 1.06 μm, 这种延伸部分的吸收是使组合脉冲激光器阈值增高的原因。如果晶体受到波长相应于其稳定色心吸收带的紫外光辐照, 就会形成瞬态吸收带 E_1 、 E_2 、 E_3 。此外, 1975年 J. Kvapil 等人^[4] 对氧氮退火的 Mo:YAG 进行氙灯辐照, 也发现了瞬态吸收现象。辐照后 40~50 分钟, 200~600 μm 范围内的吸收自动降至稳定值。

为了获得长寿命、高稳定性的 Nd:YAG 连续和高重复频率激光器, 必须滤去泵浦灯的紫外辐射, 寻找合适的滤光材料。本文利用激光振荡波长上的这种明显的瞬态吸收现象, 研究了滤光材料的紫外滤光性能。在实验上, 与 K. Mori^[2] 不同, 我们采用了组合 Nd:YAG 连续激光系统, 这样, 在 K. Mori 实验里观察到的瞬态吸收现象可以看成是在固定光泵下的稳态过程, 简化了实验手段。此外, 利用与 W. Koehner^[5,6] 分析连续 Nd:YAG 激光器的模型类似的方法, 我们获得了组合激光系统中各根棒阈值泵浦功率的相互依赖关系的公式, 与 K. Mori 的公式相比, 我们给出了含有各个系数的定量表达式。

二

把棒 I 和棒 II 串接地放在一个激光谐振腔内, 构成了一个组合 Nd:YAG 连续激光振荡器。I 是待测棒, 长度为 l_1 , 截面面积为 S_1 。II 是测量棒, 长度为 l_2 , 截面面积为 S_2 。当这个连续组合激光器达到阈值振荡时, I 棒和 II 棒有下列关系式:

$$\frac{n_{thi}}{n_{toti}} = W_{pi}\tau_f \quad (i=1, 2), \quad (1)$$

其中, n_{thi} 为阈值时棒 i 的反转粒子数密度, n_{toti} 为棒 i 总的粒子数密度, W_{pi} 为阈值时棒 i 的泵浦速率, τ_f 为 Nd:YAG 高激光能级的荧光衰减时间。

$$g_i = \sigma_{21}n_{toti}W_{pi}\tau_f \quad (i=1, 2), \quad (2)$$

其中, g_i 为阈值时棒 i 的增益, σ_{21} 为晶体的吸收截面。

$$P_{fi} = \frac{h\nu n_{thi}}{\tau_f} \quad (i=1, 2), \quad (3)$$

其中, P_{fi} 为阈值时棒 i 的荧光功率密度。

$$\frac{l_i S_i P_{fi}}{\eta_1} = \eta_2 \eta_3 P_i \quad (i=1, 2), \quad (4)$$

其中, P_i 为棒 i 的阈值泵浦功率, η_1 为晶体的总荧光功率与晶体的总吸收功率之比, η_2 为晶体的总吸收功率与灯辐射在晶体吸收带内的功率之比, η_3 为灯辐射在晶体吸收带内的功率与阈值泵浦功率之比。

由(1)、(2)、(3)和(4)式, 可以得到

$$2l_i g_i = \frac{2\eta_1 \eta_2 \eta_3 \tau_f \sigma_{21}}{S_i h\nu} P_i = \frac{2K}{S_i} P_i \quad (i=1, 2), \quad (5)$$

其中, $K = \frac{\eta_1 \eta_2 \eta_3 \tau_f \sigma_{21}}{h\nu} = \frac{\eta_1 \eta_2 \eta_3}{I_s}$, I_s 为饱和密度参量。

待测棒 I 在泵浦灯的紫外光辐照下, 在其激光波长上出现了瞬态吸收。由于我们所考虑的是组合连续激光系统, 所以, 可以把这种瞬态吸收过程看成是一定光泵功率下的稳态过程。因此, 棒 I 的损耗 α_1 包括不受泵浦功率 P_1 影响的吸收 α_1^0 和依赖于泵浦功率 P_1 上升而增大的吸收 $\alpha_1(P_1)$, 即

$$\alpha_1 = \alpha_1^0 + \alpha_1(P_1),$$

棒 II 是测量棒, 不受紫外光辐照, 其损耗 α_2 是一个常量。

组合 Nd:YAG 连续激光器的输出耦合反射镜的反射率为 R_1 , 其他各种损耗诸如反射镜的吸收和散射, 以及谐振腔的衍射损耗, 可以通过后反射镜的漏损 $(1-R_2)$ 来表示。通常, 可以忽略反射镜的吸收和散射, 但不能忽略谐振腔的衍射损耗, 它是一个随 P_1 和 P_2 而变化的量。如果这个量用 L_d 表示, 则

$$R_2 = 1 - L_d.$$

于是, 组合 Nd:YAG 连续激光器的阈值振荡条件为

$$2l_1 g_1 + 2l_2 g_2 = 2l_1 \alpha_1^0 + 2l_1 \alpha_1(P_1) + 2l_2 \alpha_2 - \ln(1 - L_d) - \ln R_1. \quad (6)$$

把(5)式代入(6)式, 我们得到

$$P_2 = \frac{S_2}{2K} (2l_2\alpha_2 + 2l_1\alpha_1^0 - \ln R_1) + \frac{S_2}{2K} \left[2l_1\alpha_1(P_1) - \frac{2K}{S_1} P_1 + \ln \left(\frac{1}{1-L_d} \right) \right] \quad (7)$$

这个公式给出了组合 Nd:YAG 连续激光器达到阈值振荡时, 棒 I 的泵浦功率和棒 II 的泵浦功率的相互依赖关系。如果 $\alpha_1(P_1)$ 值很大, 则 P_2 值随着 P_1 值的增大而增大。当 $\alpha_1(P_1)$ 值逐渐减小时, P_2 值增加的斜率就渐渐减小, 最后, 这个斜率变为负值。在无紫外光辐照的情况下, $\alpha_1(P_1) = 0$, 方程(7)变为

$$P_2 = \frac{S_2}{2K} (2l_2\alpha_2 + 2l_1\alpha_1^0 - \ln R_1) + \frac{S_2}{2K} \left[-\frac{2K}{S_1} P_1 + \ln \left(\frac{1}{1-L_d} \right) \right], \quad (8)$$

即随着泵浦功率 P_1 的增大, 泵浦功率 P_2 减小。

三

图 1 表示利用组合 Nd:YAG 连续激光器来测定激光棒在 $1.06 \mu\text{m}$ 波长上瞬态吸收的实验装置。激光输出经单色仪分光后, 由光电倍增管接收, 通过示波器显示来确定组合激光器的振荡阈值。为了研究激光器中防止激光棒产生色心的紫外滤光材料的滤光特性, 我们把两种滤光材料作成棒和灯的两组冷却水套(分别称为样品套 A 和样品套 B)。在图 1 所示的实验装置中, 棒 I 和灯 I 的外套用样品套 A, 或者用样品套 B, 并用自来水冷却, 对于棒 I 在这两种情况下的瞬态吸收的变化进行了观察。如果用普通的 GG-17 玻璃水套或别的样品套, 并用 1% 重铬酸钾溶液冷却待测棒 I, 灯光中 5000 \AA 以下的辐射就被滤去, 因而, Nd:YAG 棒内不会感生瞬态色心, 这属于 $\alpha_1(P_1) = 0$ 的情况。在实验中, 测量棒 II 始终用重铬酸钾溶液冷却。

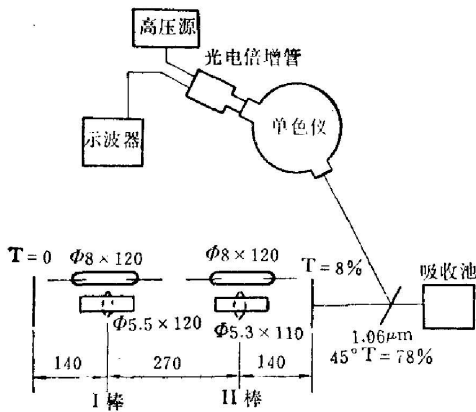


图 1 利用组合 Nd:YAG 连续激光器测量棒的瞬态吸收的实验装置

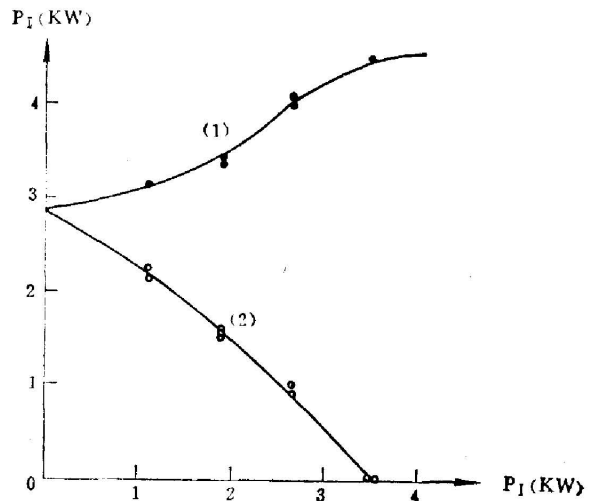


图 2 用 GG-17 玻璃套时, 泵浦功率 P_2 随泵浦功率 P_1 变化的函数关系

(1) 棒 I 用自来水冷却; (2) 棒 I 用重铬酸钾溶液冷却

当棒 I 和灯 I 的外套均用 GG-17 玻璃水套, 棒 I 分别用自来水和 1% 重铬酸钾溶液冷却时, 测得的泵浦功率 P_2 随泵浦功率 P_1 而变化的函数关系如图 2 所示。实验结果表明, 当用自来水冷却时, 随着 P_1 值的增大, P_2 值也增大, 这是因为公式(7)中的 $\alpha_1(P_1)$ 值相当

大,待测样品的这个瞬态吸收项的贡献超过其增益项。而当用重铬酸钾溶液冷却时,不存在瞬态吸收项,在公式(8)中待测棒增益项的贡献使 P_2 值随着 P_1 值的增大而减小。

当棒 I 和灯 I 的外套均用样品套 A , 棒 I 分别用自来水和重铬酸钾溶液冷却时,测得的泵浦功率 P_2 随泵浦功率 P_1 而变化的函数关系如图 3 所示。比较图 3 中的曲线 I 和图 2 中的曲线 I , 可以看到,用自来水冷却时,样品套 A 具有一定的紫外滤光性能。而图 3 中的曲线(1)和(2)表明,激光棒中仍有瞬态吸收存在。用样品套 B 代替样品套 A 进行同样实验,结果表明,棒 I 的瞬态吸收显著减小(图 4)。

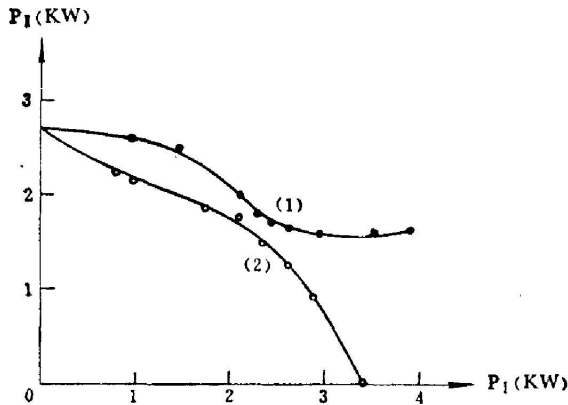


图 3 用样品套 A 时,泵浦功率 P_2 随泵浦功率 P_1 变化的函数关系

(1) 棒 I 用自来水冷却; (2) 棒 I 用重铬酸钾溶液冷却

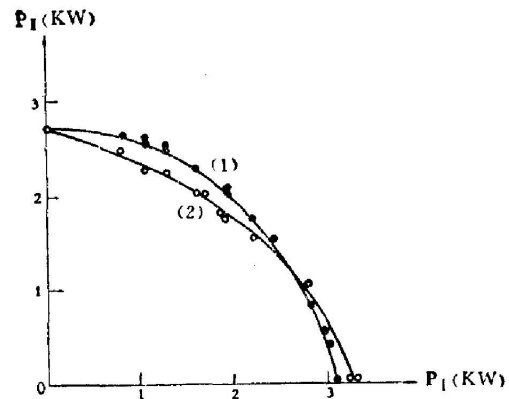


图 4 用样品套 B 时,泵浦功率 P_2 随泵浦功率 P_1 变化的函数关系

(1) 棒 I 用自来水冷却; (2) 棒 I 用重铬酸钾溶液冷却

因此,在同一滤光样品套中,待测激光棒分别用重铬酸钾溶液和自来水冷却,并从实验上测定激光器的 P_2-P_1 的函数关系。通过比较这两种冷却液下 P_2-P_1 曲线的变化情况,就可以方便地确定该滤光样品的紫外滤光性能,从而可以鉴别该样品是否为合适的滤光材料。关于 A 、 B 套的光谱特性问题,将另文发表。

四

在我们的实验中,所用的是组合 Nd:YAG 连续激光器,这种激光器的谐振腔比较长,由于泵浦功率的变化,激光棒的热焦距也会发生变化,而且这种变化范围是很大的。所以,谐振腔可能会从稳定工作区移至损耗较大的非稳定工作区。因此,在公式(7)中,衍射损耗项内的 $(1-L_a)$ 的变化应该特别加以考虑。通过计算机计算,并根据文献[6,7]的结果,可以估计这个衍射损耗项的大小。计算表明,衍射损耗项的存在,是图 4 中两条曲线在末端交叉的原因。

此外,我们也可以在 $P_1=0$ 的条件下,利用改变 R_1 值的实验方法,确定 K 等参量的值^[6]。这时,我们可以把上述的实验曲线变换成不包含衍射损耗项的曲线。于是,对于同一滤光样品套,用重铬酸钾溶液和自来水冷却时,得到两条经过变换的曲线。根据这两条曲线的差值,可以确定待测棒在这种滤光样品中的瞬态吸收系数。

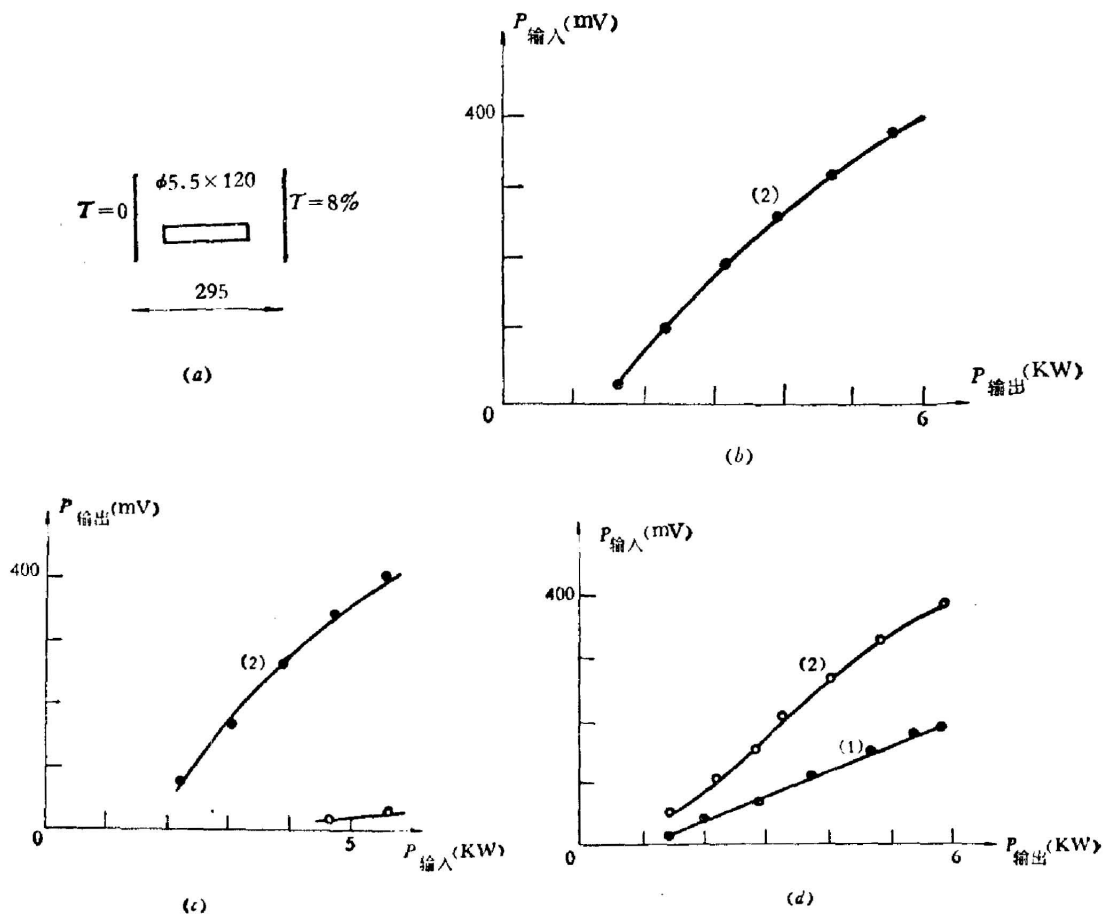


图 5

(a) 测量输出功率随泵浦功率变化的函数关系的实验装置; (b) 棒套和灯套用 GG-17 玻璃套;
 (c) 棒套和灯套用样品套 A; (d) 棒套和灯套用样品套 B
 (1) 激光棒用自来水冷却时, 输入功率随泵浦功率变化的函数关系
 (2) 激光棒用重铬酸钾溶液冷却时, 输入功率随泵浦功率变化的函数关系

由图 4 可以看到, 样品套 B 具有明显的紫外滤光性能, 但是棒 I 在 $1.06 \mu\text{m}$ 波长上还是存在着小的瞬态吸收。事实上, 只要有瞬态吸收项存在, 即使其数值不大, 它对单棒连续激光器输出功率的影响将是十分明显的, 其原因是, 在组合连续激光器的上述阈值振荡条件中, 瞬态吸收项和增益项是以线性迭加方式相抵消的, 而在单棒激光振荡器中, 瞬态吸收项出现在分母中, 增益项的贡献以反比于瞬态吸收项的方式减小, 因而, 会使谐振腔内的稳态功率密度和输出功率值显著地减小。在图 5(a) 所示的棒 I 连续激光振荡器中, 谐振腔内的稳态功率密度可以写成

$$I = I_s \left(\frac{2l_1 g_1}{2l_1 \alpha_1^0 + 2l_1 \alpha_1 (P_1) - \ln R_{os1} R_{os2}} - 1 \right),$$

其中, R_{os1} 和 R_{os2} 为连续振荡器的输出镜的反射率和后反射镜的反射率。图 5(b)、(c)、(d) 表示单棒激光振荡器输出功率 P_{out} 随输入功率 P_{in} 而变化的实验结果。这里激光棒 (棒 I) 和灯用了不同的滤光套, 并分别用重铬酸钾溶液和自来水冷却。实验表明, 如果用 GG-17 玻璃套和自来水冷却, 则激光器无输出。如果用样品套 A 和自来水冷却, 则激光输出功率

很小。当用样品套 *B* 和自来水冷却时, 激光输出功率有相当的提高, 但它与用重铬酸钾溶液冷却的结果相比, 其输出功率值低一倍左右。

作者对吴光照同志在本工作中给予的帮助表示感谢。

参 考 文 献

- [1] J. B. Willis, M. Dixon; *J. Crystal Growth*, 1968, **3-4**, 236.
- [2] K. Mori; *Japan J. A. P.*, 1973, **12**, No. 2 (Feb), 325.
- [3] K. Mori; *Physica Status Solidi(a)*, 1977, **42**, No. 1 (Jan), 375.
- [4] J. Kvapil *et al.*; *Kristall und Technik*, 1975, **10**, 1051.
- [5] W. Koechner; *Laser Focus*, 1970, **6**, No. 4 (Apr), 37.
- [6] W. Koechner; *Solid-State Laser Engineering*, (Springer-Verlag, New York 1976.)
- [7] W. K. Kahn; *Appl. Opt.*, 1966, **5**, No. 3 (Mar), 407.

Investigation of filtering materials suitable to lasers using transient absorption in Nd:YAG crystals

YE BIQING, ZHA GUIGEN AND MA ZHONGLIN

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

(Received 27 May 1980)

Abstract

The obvious transient absorption at the laser wavelength in Nd:YAG laser crystals is attributed to the production of transient colour centres, induced by UV light irradiation. The filtering characteristics of the materials are investigated by means of this phenomenon. The filtering materials suitable to lasers are selected effectively using the combined Nd:YAG cw laser system. In addition, we obtained the relation between pumping powers of different rods at the threshold in the combined laser. As compared with Mori's, our formula is a quantitative expression containing a variety of coefficients.