

固体激光器

——激光输出特性
及调Q特性



张笑颖 13307110540
施方正 13307110440

固体激光器组成

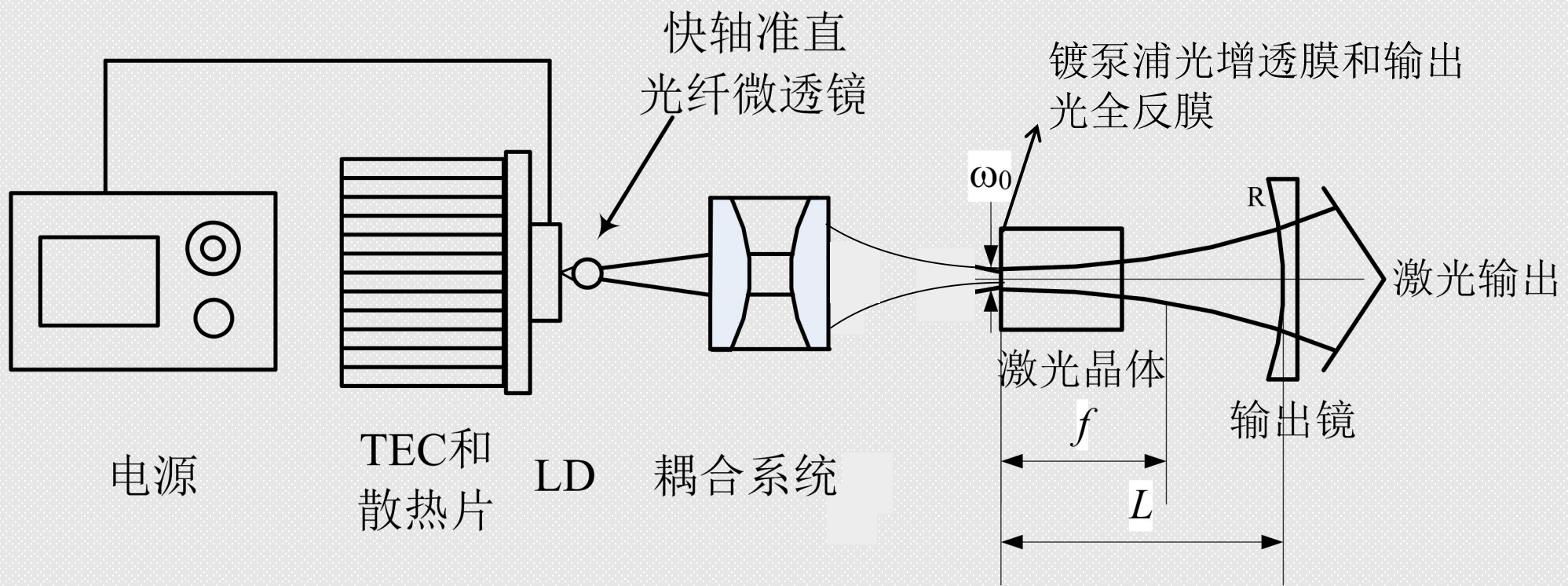


图1 Nd : YAG固体激光器结构示意图

[摘自大恒新纪元科技股份有限公司-固体激光原理与技术综合实验实验讲义]

固体激光器组成

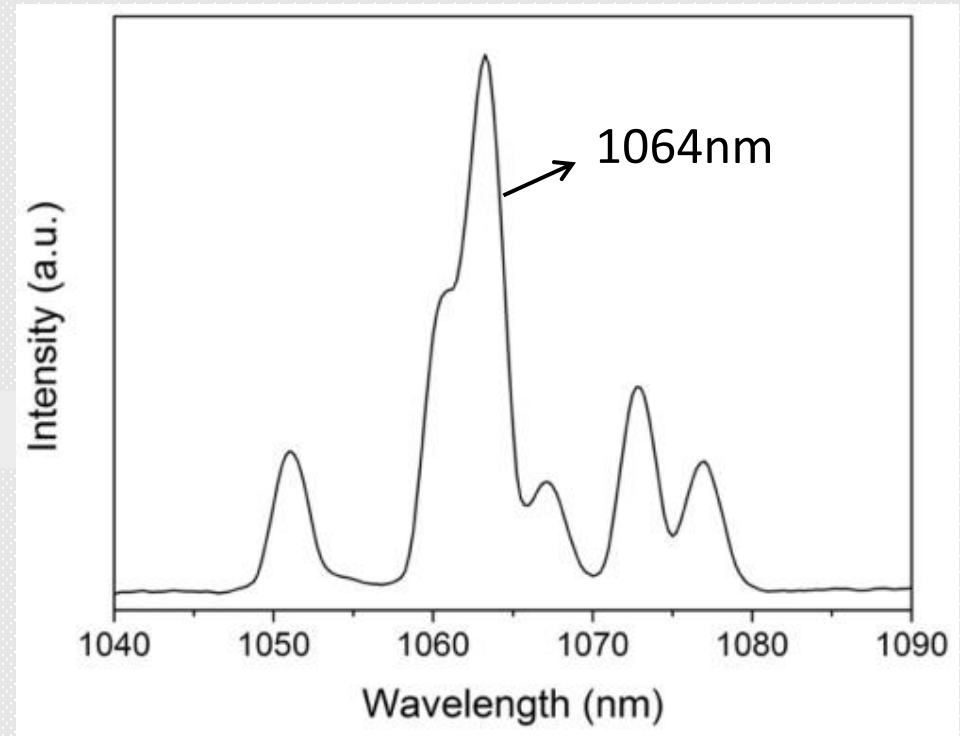
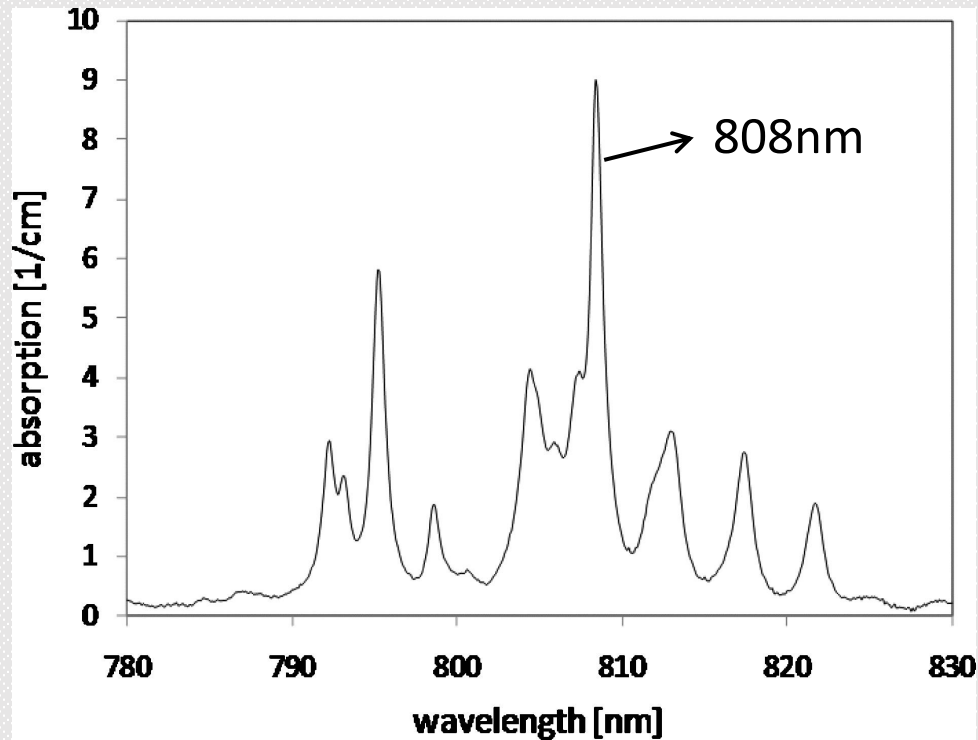


图2 Nd : YAG吸收光谱与荧光光谱

[摘自Forty years of lasers at ELOP–Elbit Systems, Nissim Zafrani ; Zachary Sacks, etc; Effect of air annealing on the optical properties and laser performance of Nd:YAG transparent ceramics, Yuelong Fu, Jiang Li, etc]

泵浦源输出特性

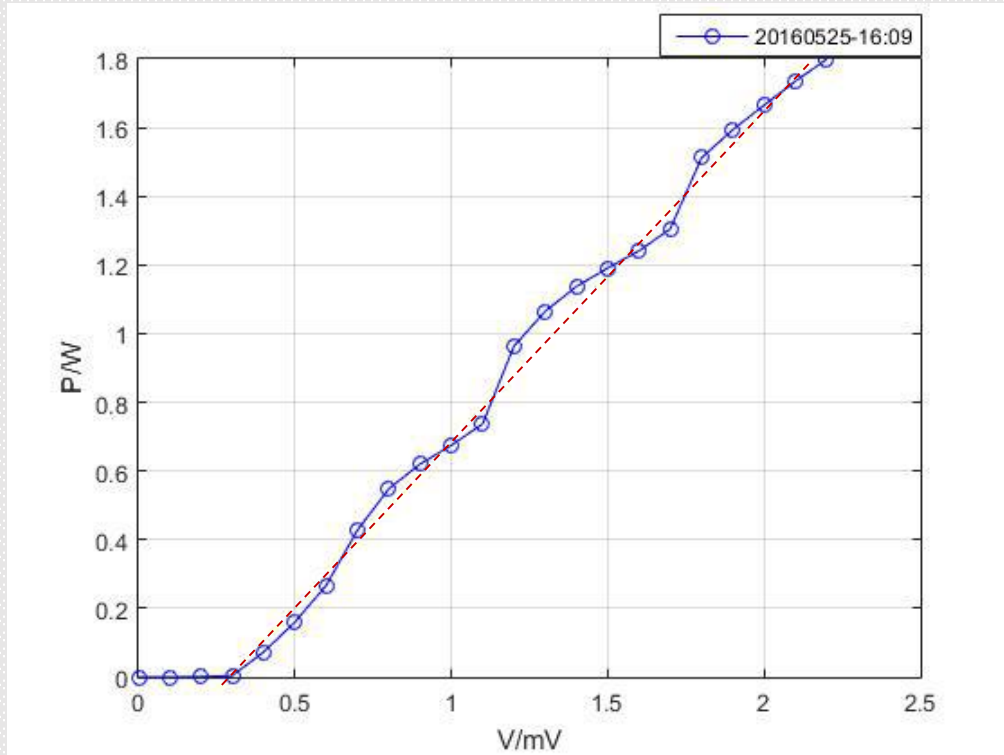


图3 泵浦源P-V曲线

$$P = (0.91 \pm 0.02)V + (-0.19 \pm 0.02)$$

$$R^2 = 0.98$$

$$P = P_{th} + \frac{\eta_d h \nu}{e} (I - I_{th})$$

- 1、泵浦源输出光单色性差
- 2、泵浦源温度变化

泵浦源输出特性 对温度敏感性

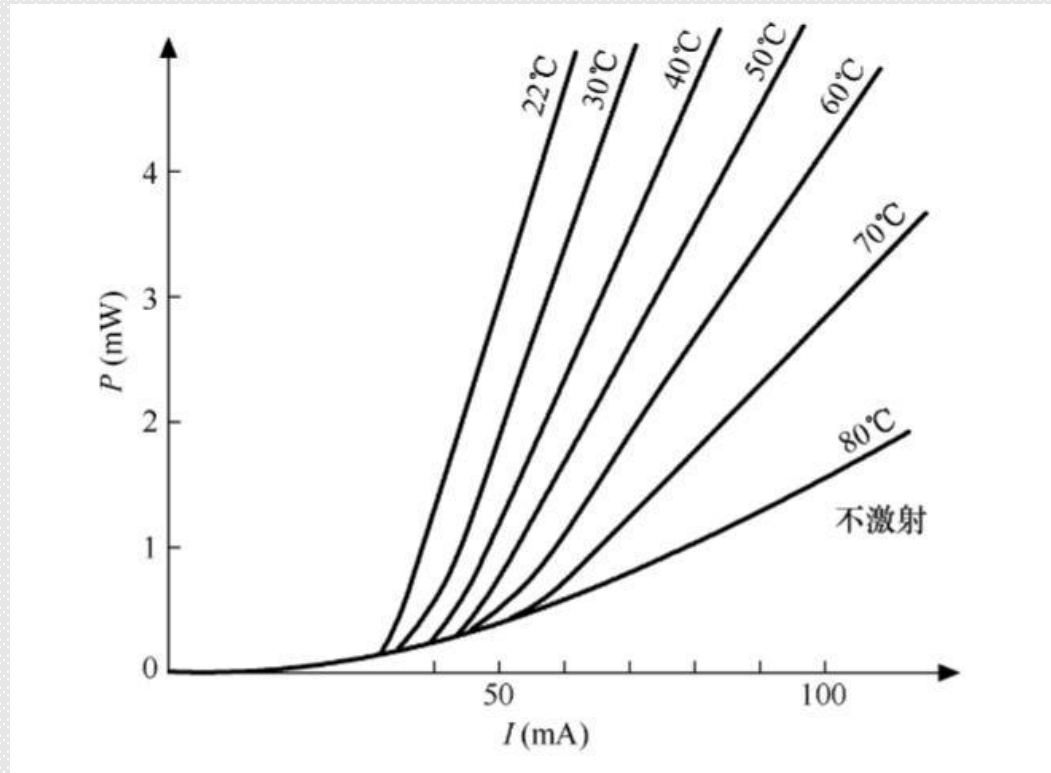


图4 温度对半导体激光输出影响
[摘自半导体激光器输出特性的影响因素]

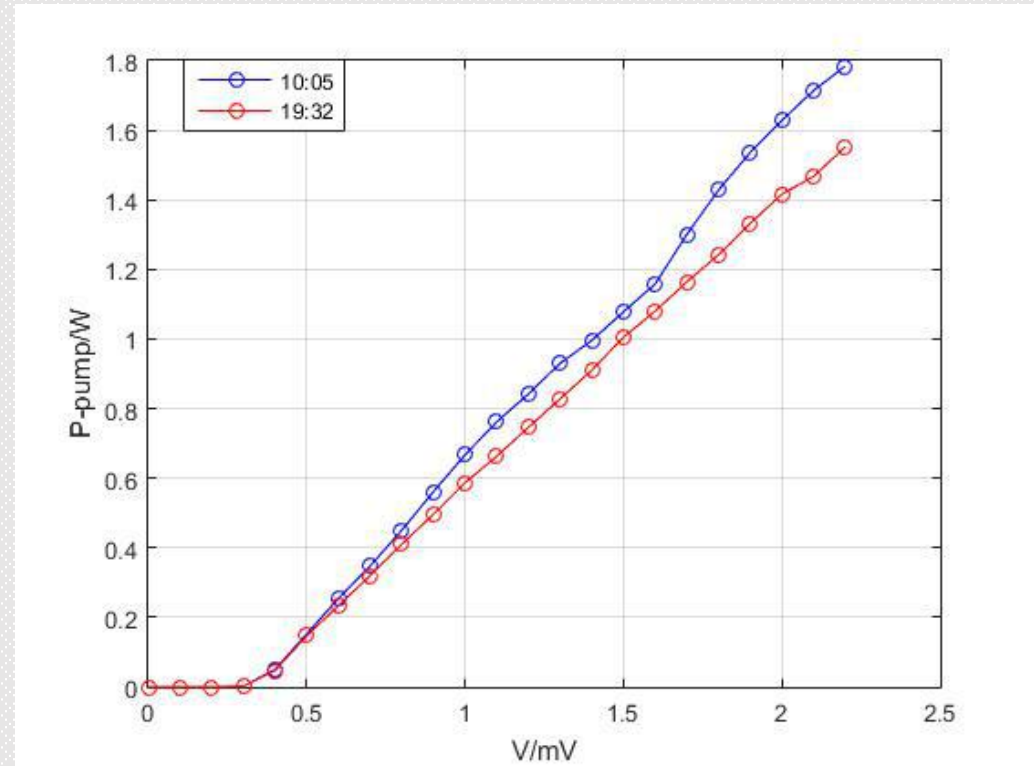


图5 不同时间对泵浦源P-V曲线测量
[蓝色：上午10:00；红色：下午19:30]

1064nm激光输出特性

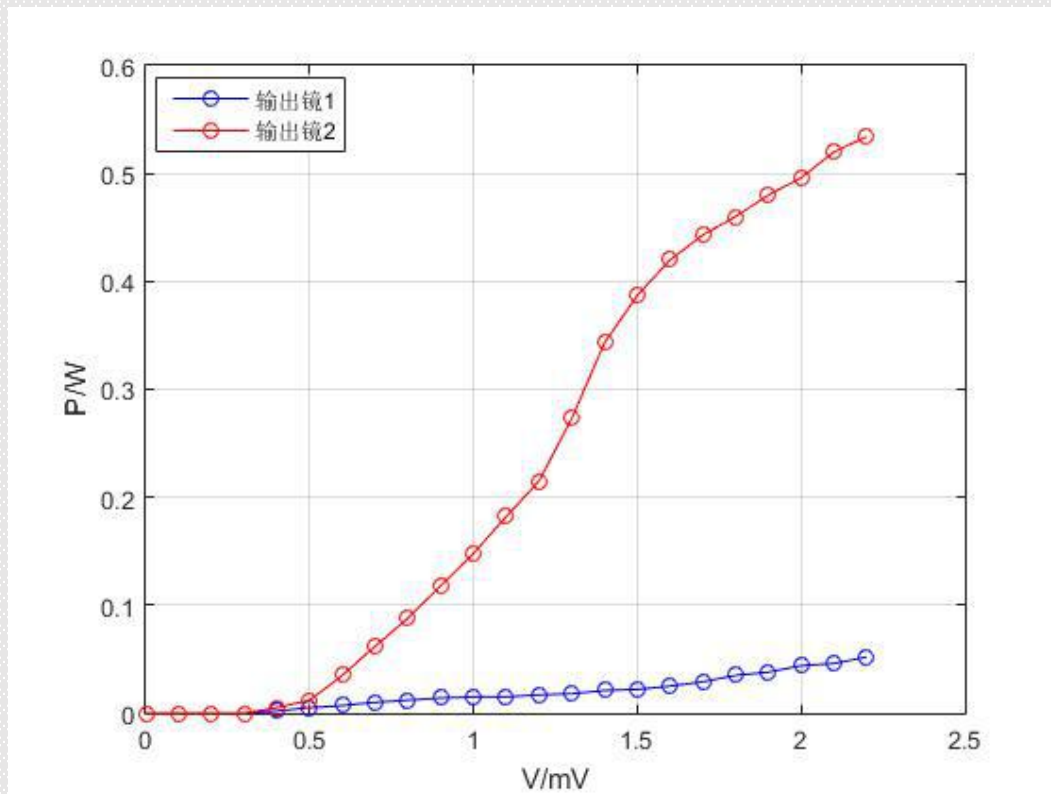


图6 用输出镜1、2分别输出1064nm激光

输出镜1 : $V_{th} = 1.60mV$

$P_{max} \approx 0.05W$

输出镜2 : $V_{th} \approx 0.05mV$

$P_{max} \approx 0.55W$

输出镜与激光输出特性

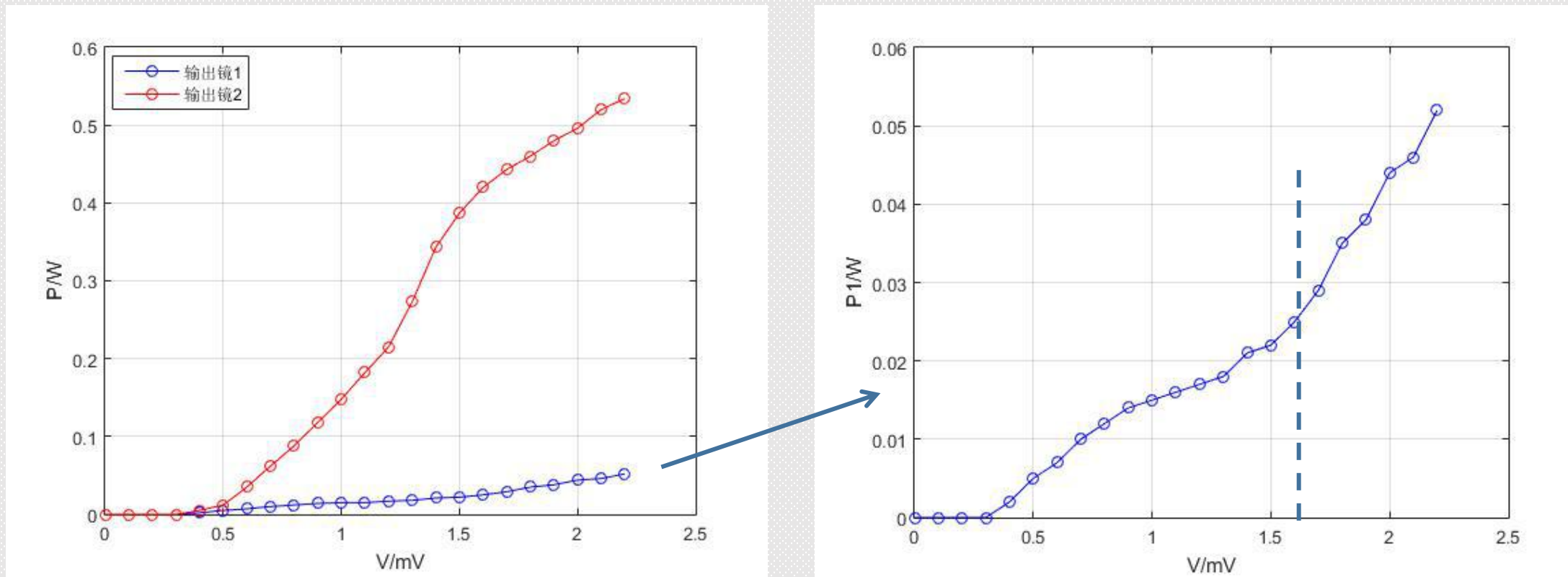


图7 用输出镜1、2分别输出1064nm激光

输出镜透过率测量对808nm

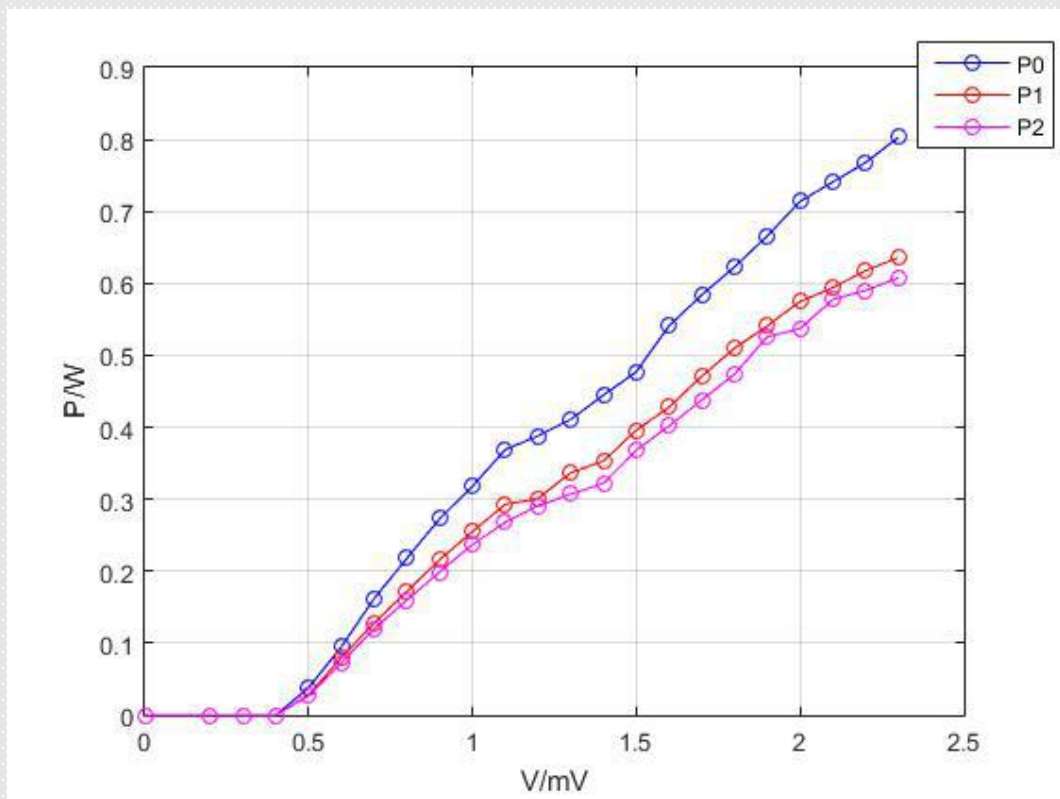


图8 输出镜1、2对808nm泵浦源的透过功率

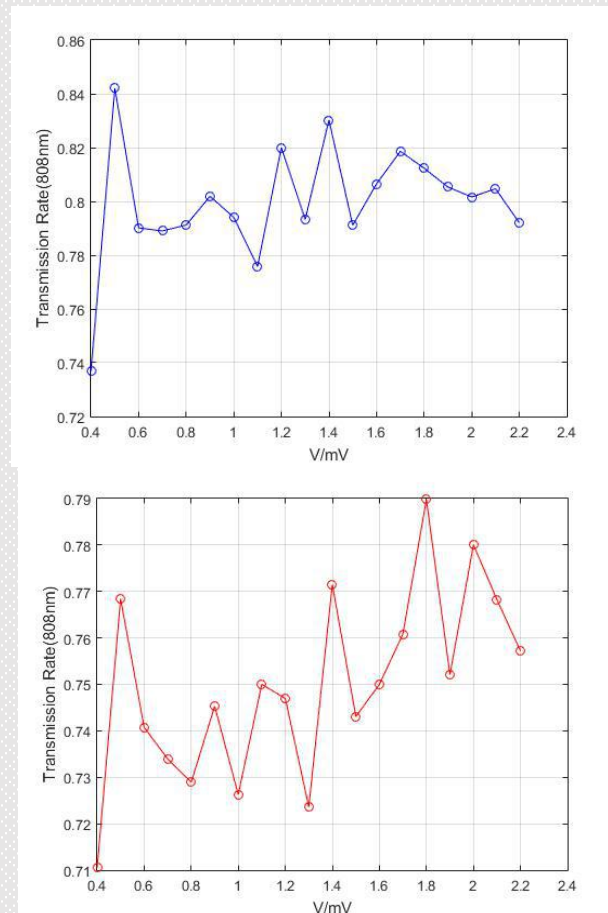
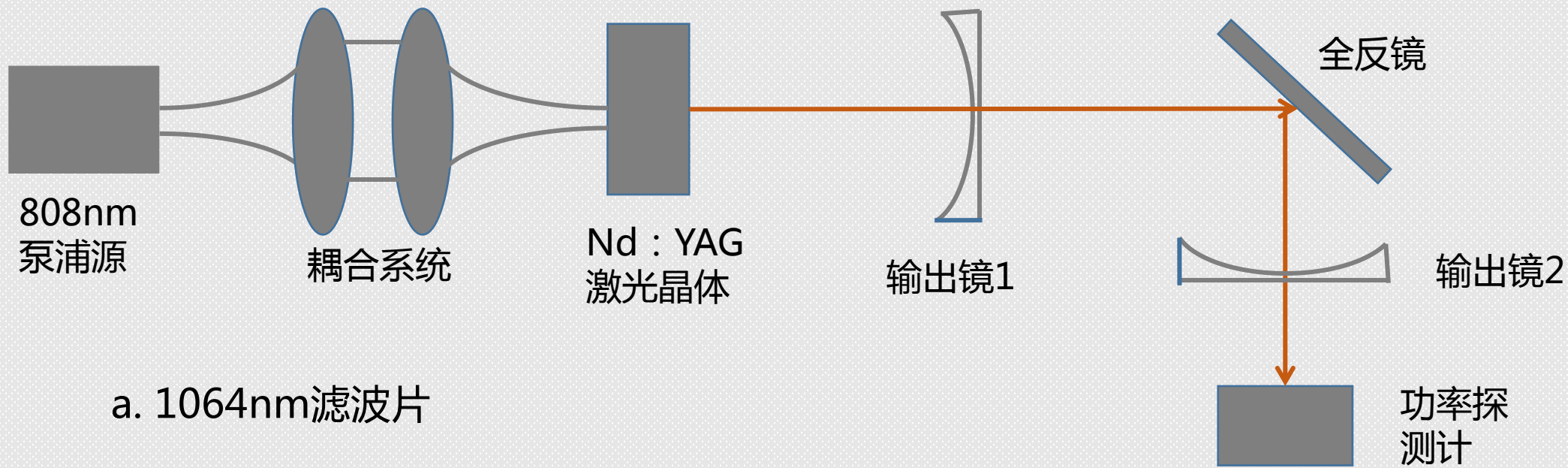


图9 输出镜1、2对808nm泵浦源的透过率

$$T_1 \approx 80\%$$

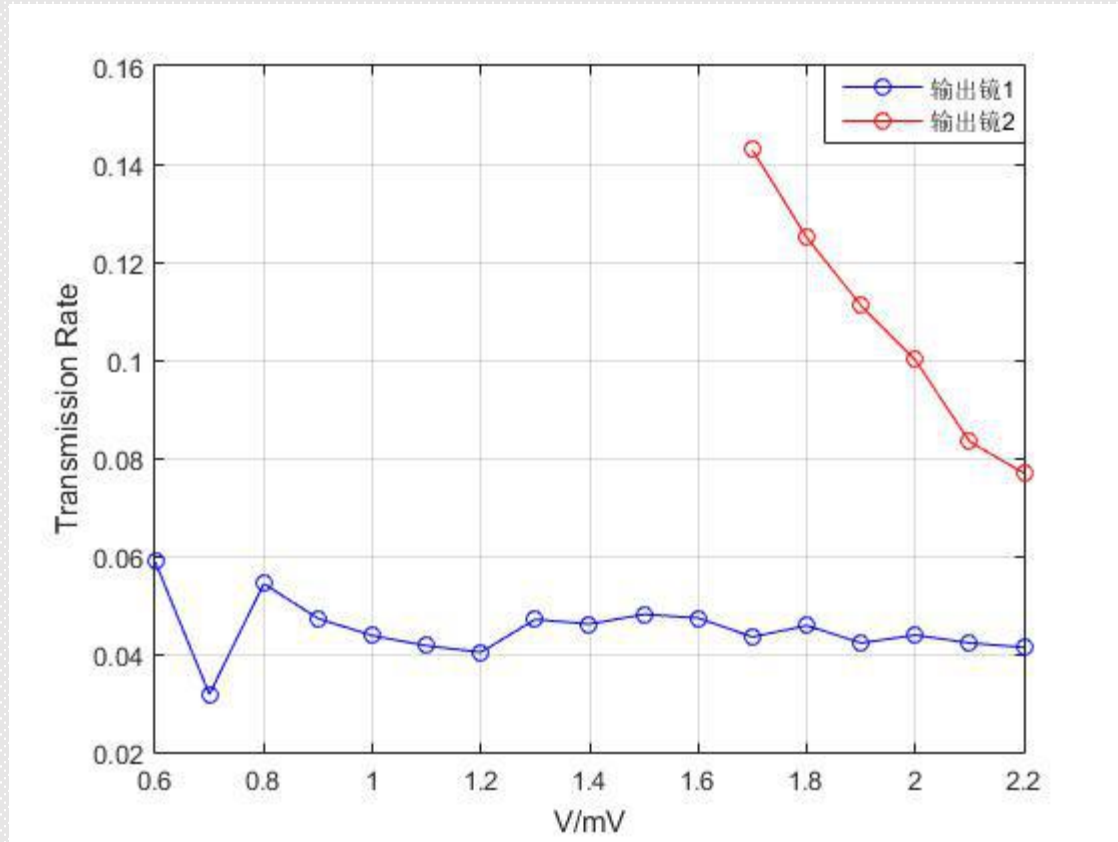
$$T_2 \approx 75\%$$

输出镜透过率测量 对1064nm-测量方法



- 1064nm滤波片
- 可调控大小的光阑
- 全反镜加长探测距离

输出镜透过率测量 透过率与输出功率



$$T_1 \approx 4\% \quad \eta_1 \approx 3\%$$

$$T_2 \approx 10\% \quad \eta_2 \approx 30\%$$

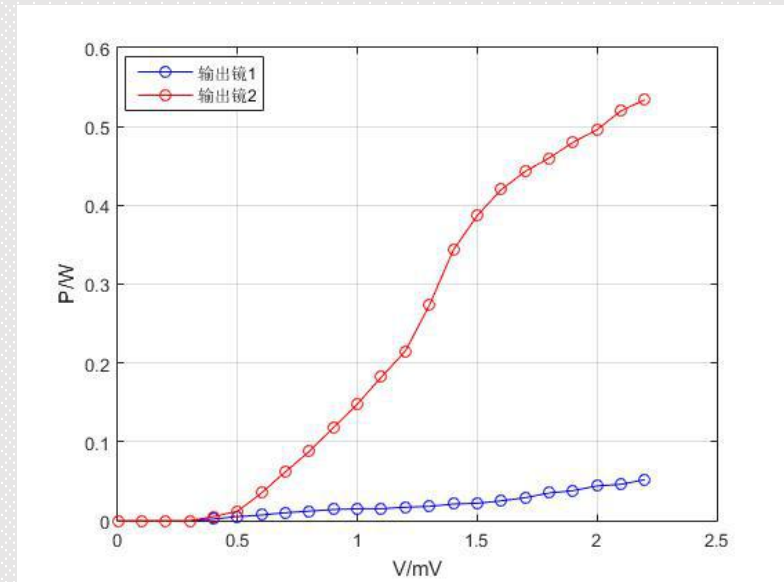


图10 输出镜1、2对1064nm激光透过率随工作电压变化

输出镜透过率测量 透过率与输出功率

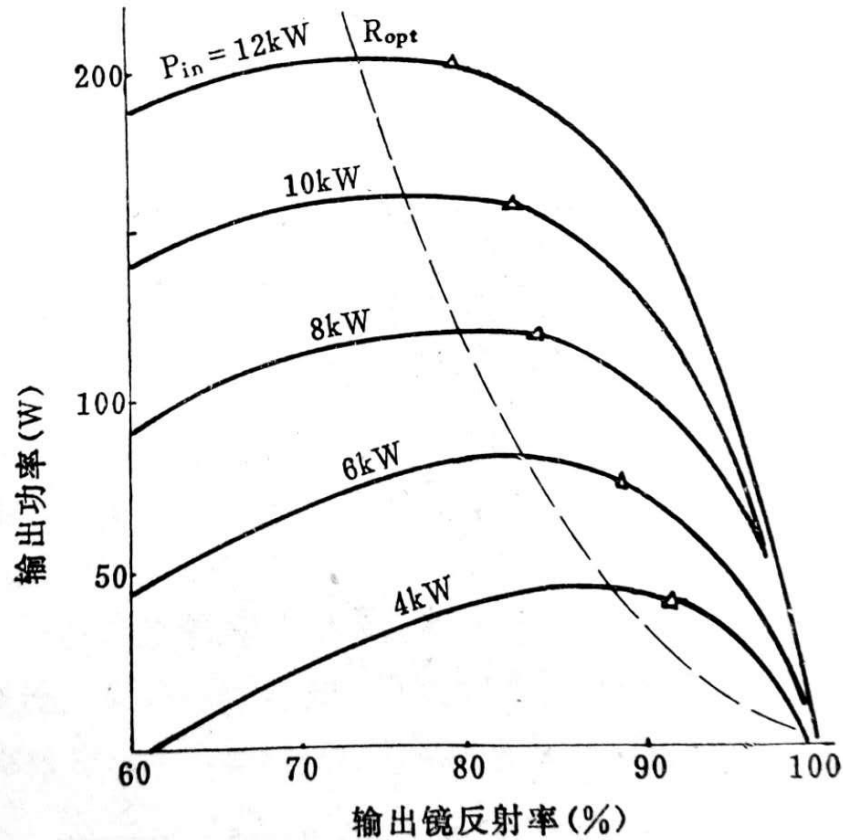


图11 YAG连续激光器的最佳耦合输出
[摘自徐荣甫, 刘敬海, 激光器件与技术教程北京工业学院出版社, 164页]

$$T_1 \approx 4\% \quad \eta_1 \approx 3\%$$

$$T_2 \approx 10\% \quad \eta_2 \approx 30\%$$

$$P_{th} = (2\alpha_i l + \ln \frac{1}{R}) / 2K$$

$$T_{opt} = \sqrt{\frac{P_{in} - P_{th1}}{P_{th2}^0}} - (2\alpha_i l)$$

腔长与激光输出特性

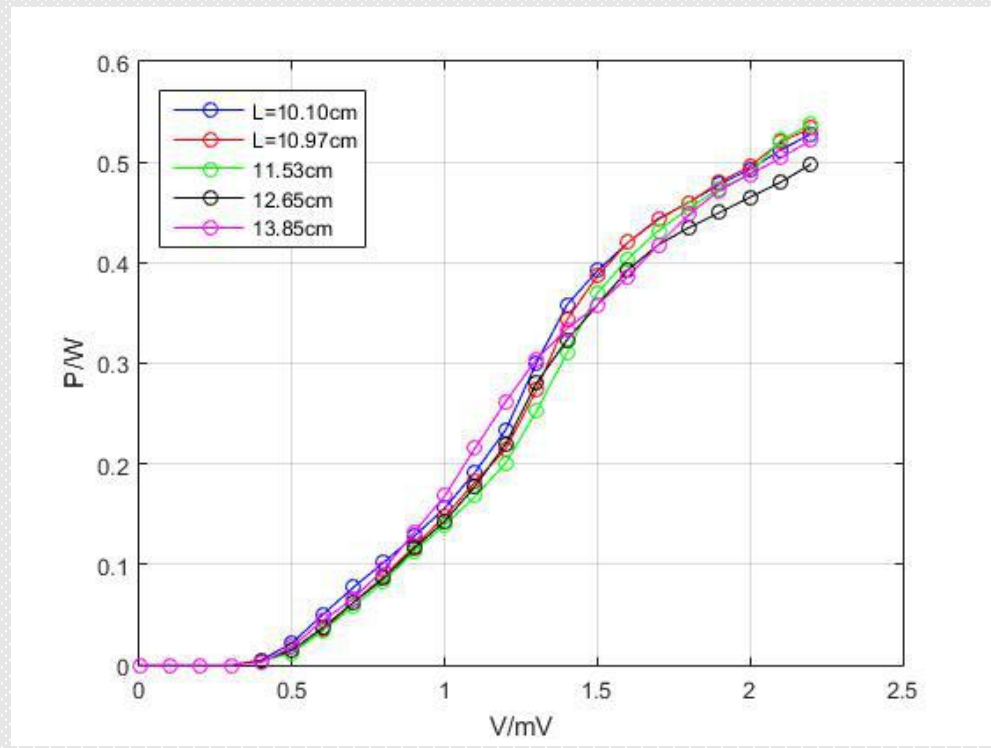
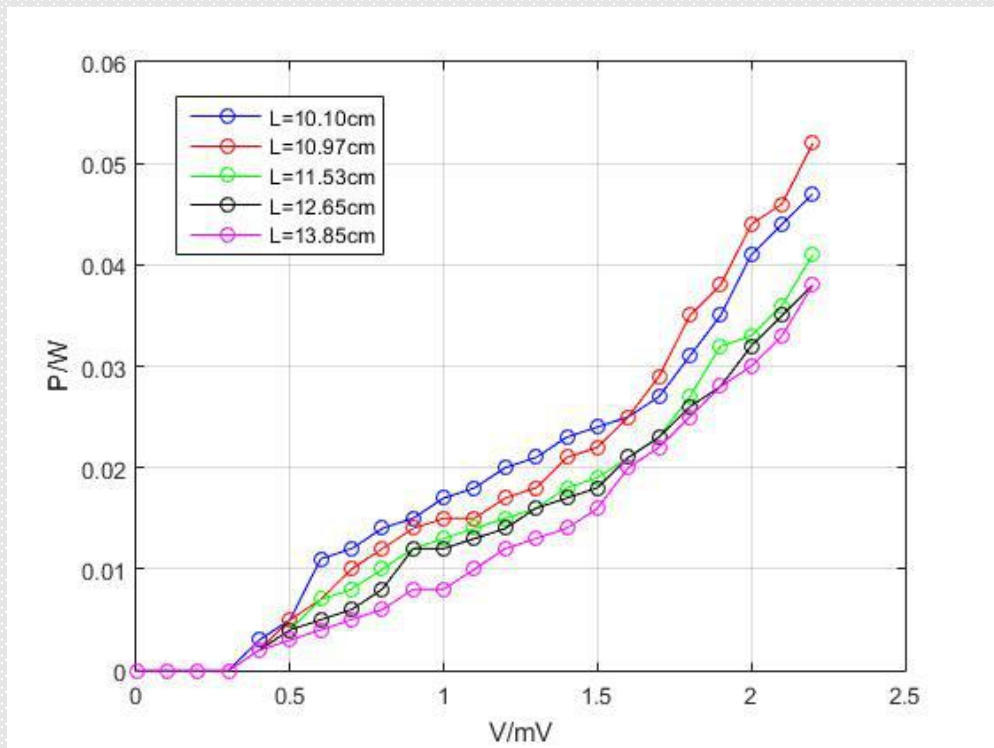


图12 两输出镜输出激光随腔长变化

不同模式输出特性



图13 1064nm激光基模输出示意图

| 输出模式 | | 最大输出功率/W |
|-------------------|-------|----------|
| TEM ₀₀ | ● | 0.567 |
| TEM ₀₁ | ●● | 0.404 |
| TEM ₀₂ | ●●● | 0.360 |
| TEM ₁₁ | ●● ●● | 0.327 |
| TEM ₀₃ | ●●●● | 0.278 |

影响输出特性的因素

- 1、控温系统(泵浦源，耦合镜，激光晶体)
- 2、输出镜透过率——选择最佳透过率
- 3、各镜子表面干净度
- 4、系统准直性（模式输出）——基模输出功率最大

什么是Q?

损耗

几何偏折损耗

衍射损耗

透射损耗

吸收介质

$$\alpha = -\frac{1}{I} \frac{dI}{dz}$$

单程损耗 $\delta = \alpha L$

$$\delta = \sum_i \delta_i$$

光子在腔内平均寿命

$$\tau_R = \frac{L'}{\delta c}$$

Q定义

$$Q = \omega \frac{E}{P} = 2\pi\nu \frac{L'}{\delta c}$$

调Q的原理

核心：损耗 $\delta \rightarrow$ 反转布居数

高损耗 高阈值 积累亚稳态粒子数

打开调Q“开关”

损耗和阈值瞬间降低 强激光脉冲

机械转镜法

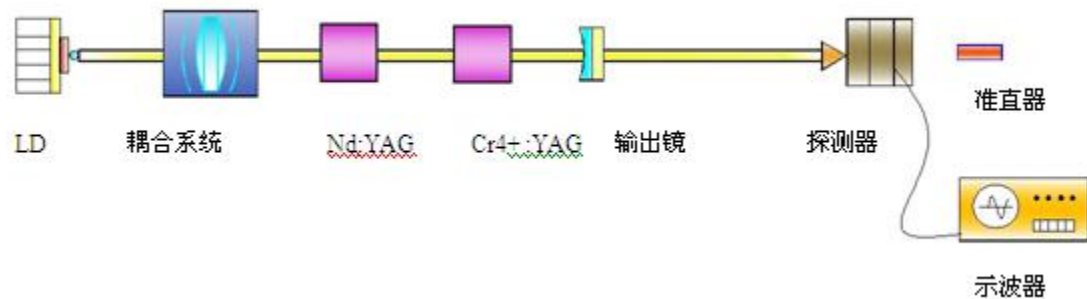
声光调Q

电光调Q

.....

本实验采用可饱和吸收调Q晶体
Cr⁴⁺:YAG

透过率：小 \rightarrow 饱和 \rightarrow 大



调Q激光性质

脉冲功率

输出特性

尖峰功率

脉冲形状

脉冲形状

脉冲半高宽

脉冲周期

重频

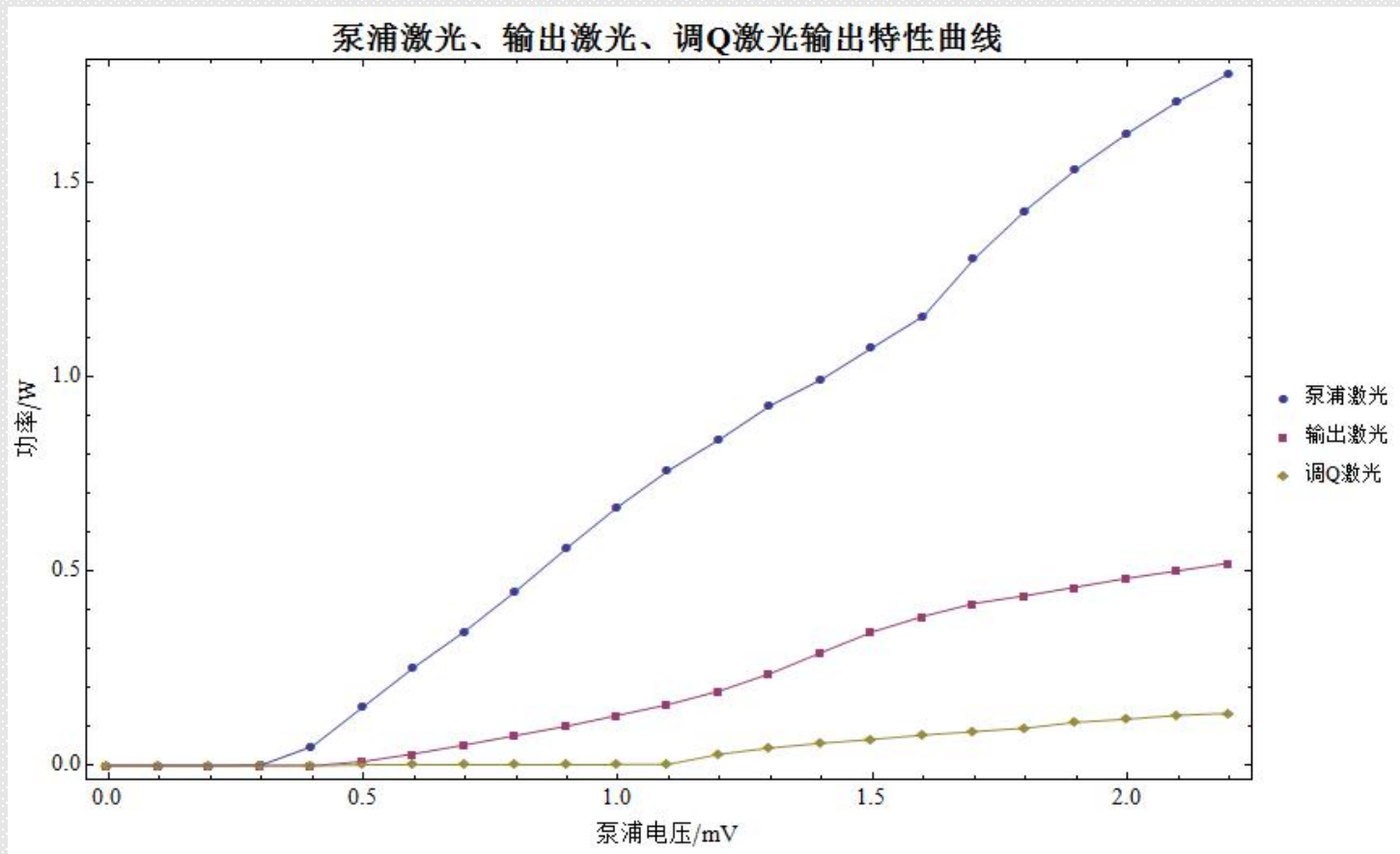
输出特性

腔长25.14cm

阈值电压

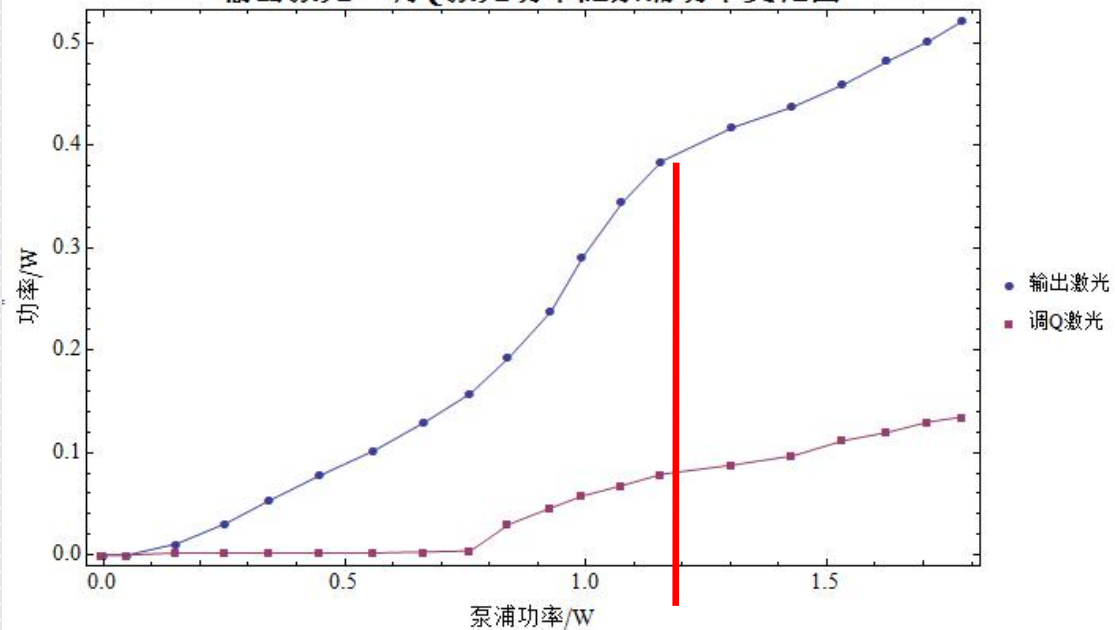
线性拟合反推

泵浦：0.33mV
输出：0.54mV
调Q：1.06mV

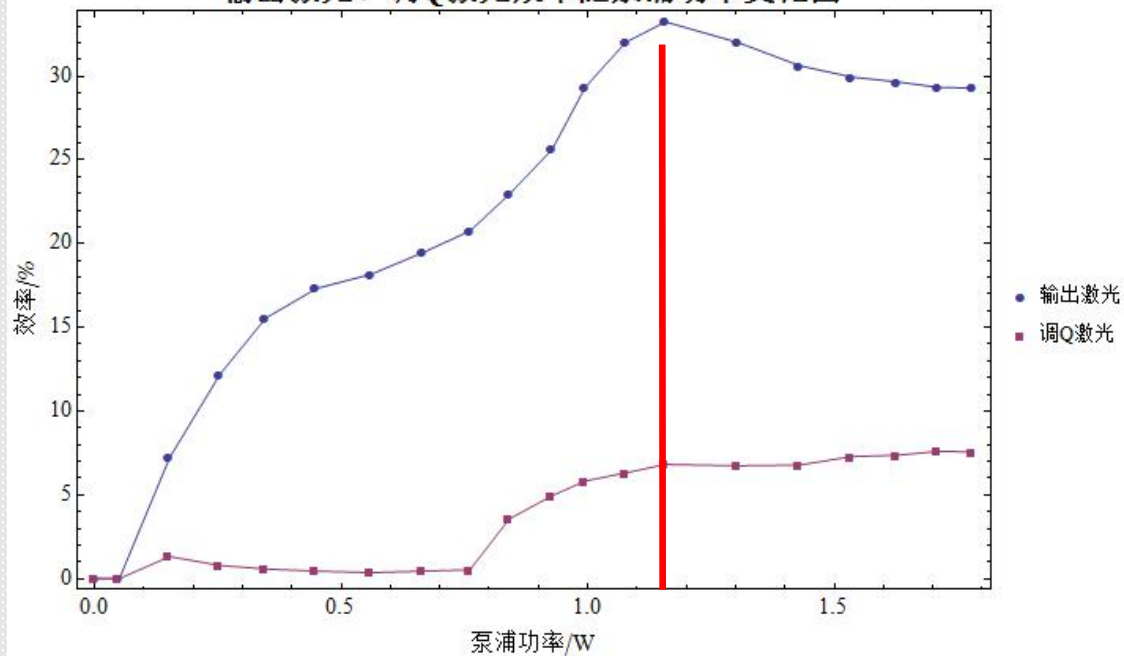


输出特性

输出激光、调Q激光功率随泵浦功率变化图



输出激光、调Q激光效率随泵浦功率变化图



尖峰功率

功率计探头（光电倍增管）测得的是时间平均的功率

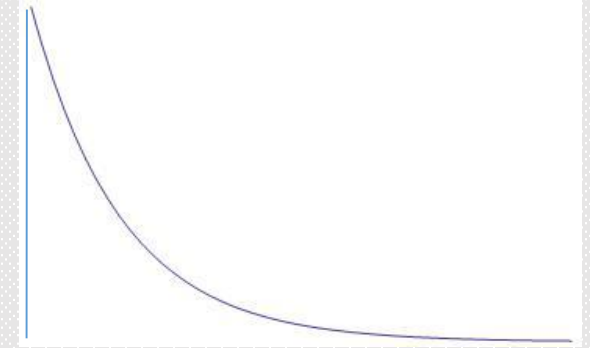
假设脉冲是一个形如 $P = \frac{1}{T} \int_0^T A e^{-\frac{t}{\tau}} dt$ 的函数

其中A为峰值功率，T为重复周期。

时间常数 $\tau = \frac{m}{\ln 2}$ ，m为脉半高宽。

则峰值功率

$$A = \frac{PT}{\tau(1 - e^{-\frac{T}{\tau}})} = \frac{PT \ln 2}{m(1 - e^{-\frac{T \ln 2}{m}})}$$



$$P_m \propto N_m ST$$

透射率越大，峰值功率越高

$\frac{\Delta n_i}{\Delta n_t}$ 越大，光子数密度最大值越大

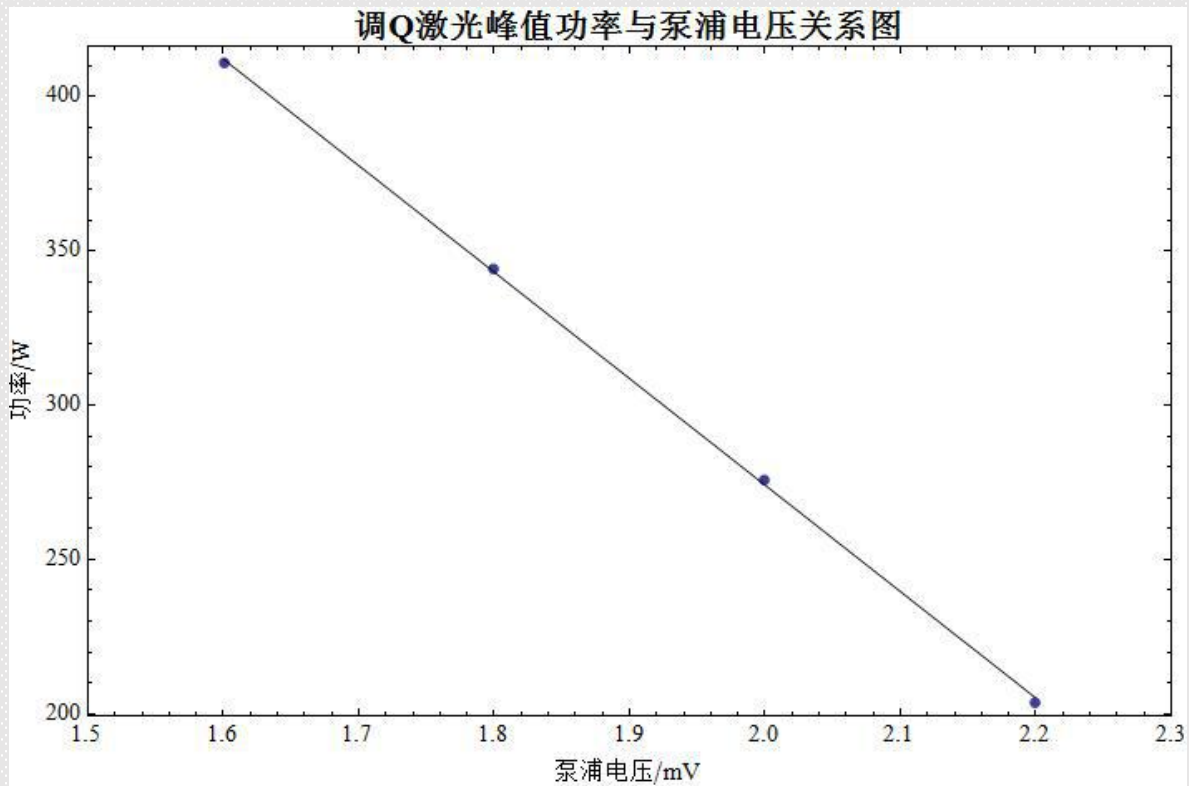
泵浦功率

调Q打开损耗

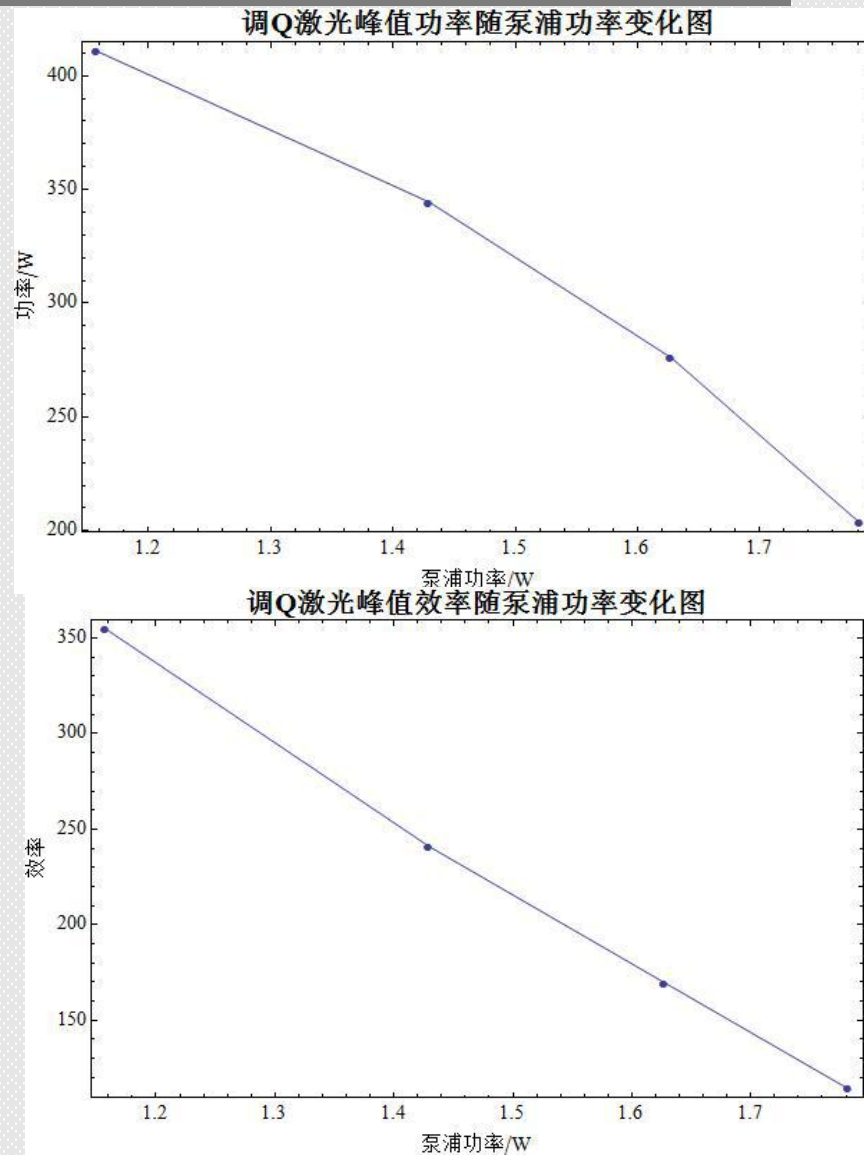
调Q关闭损耗

激光上能级寿命

尖峰功率

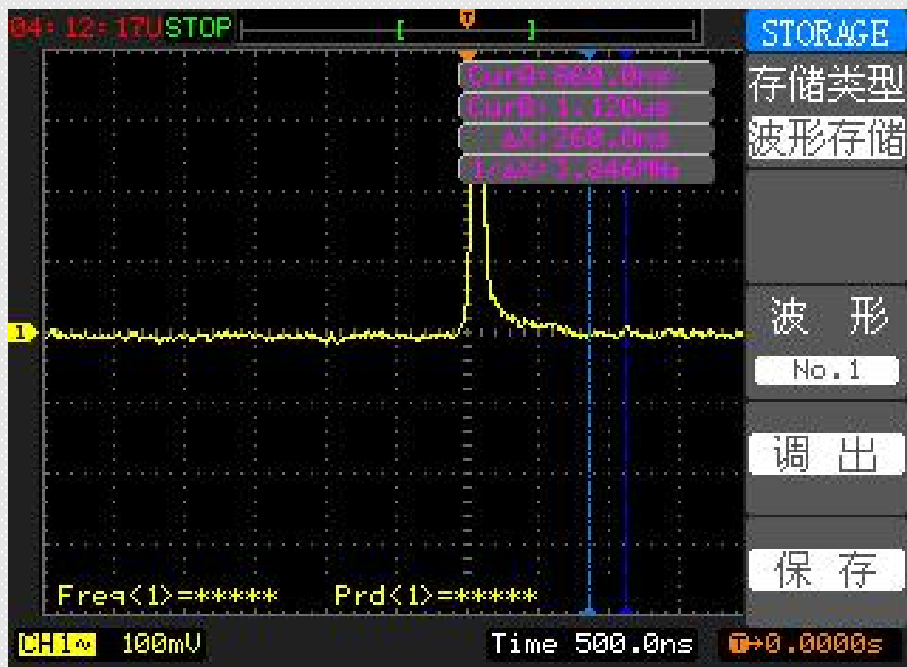


$$P_m(W) = -345(\pm 5)U(mV) + 964(\pm 9)$$

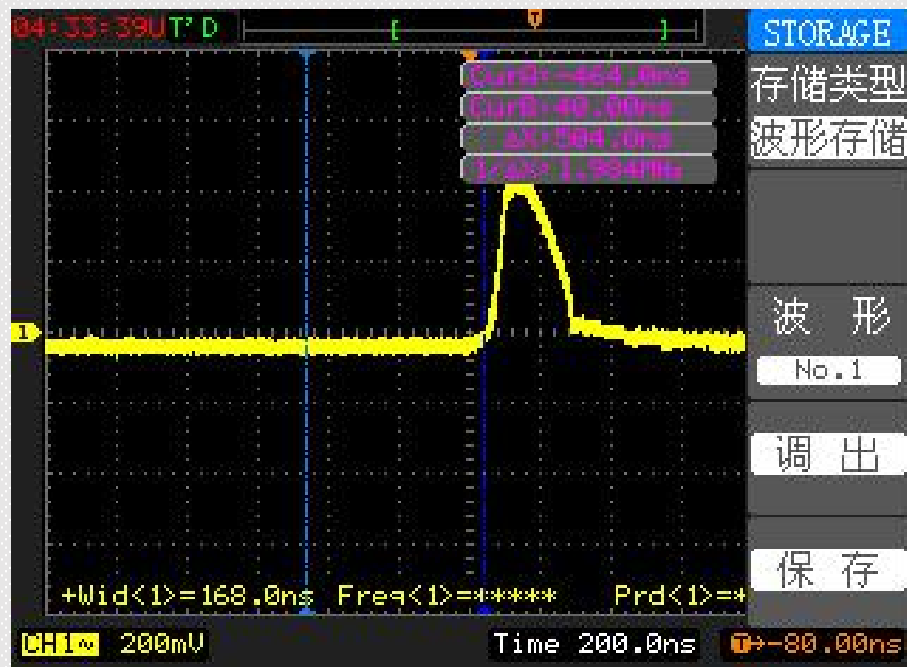


脉冲形状

采用 50Ω 的接入电阻示波器观察



腔长：20.15cm
泵浦电压：2.20V

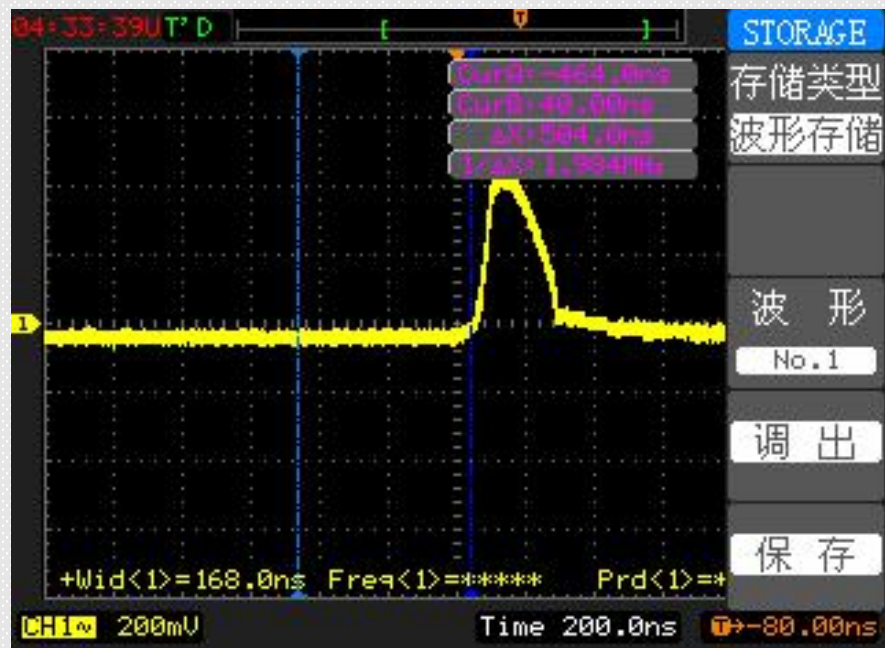


腔长：21.83cm
泵浦电压：2.20V

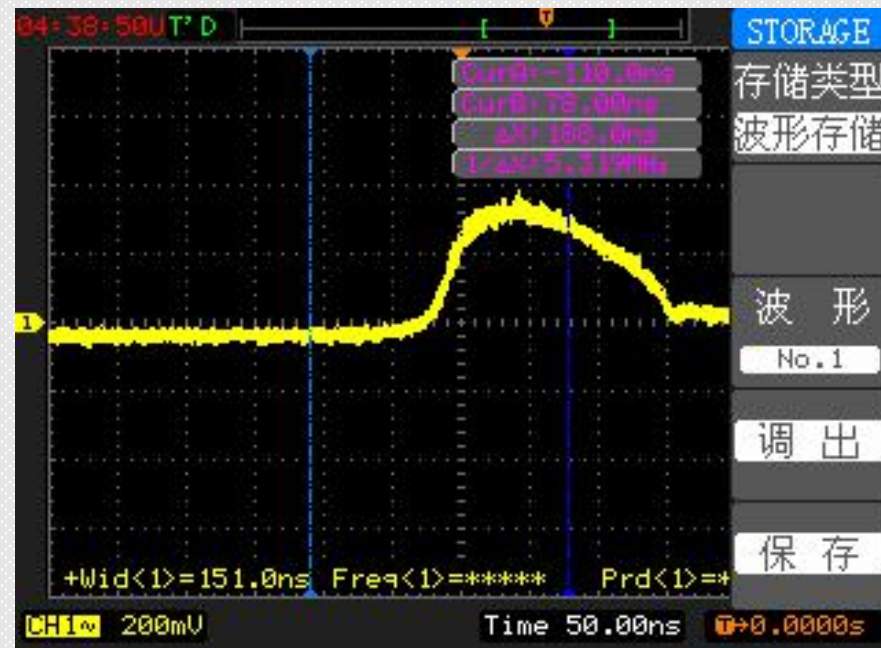
泵浦电压相同时，腔长越长，脉宽越宽，峰值越小

脉冲形状

前沿陡峭，后沿稍平缓的脉冲波形



腔长：21.83cm
泵浦电压：2.20V

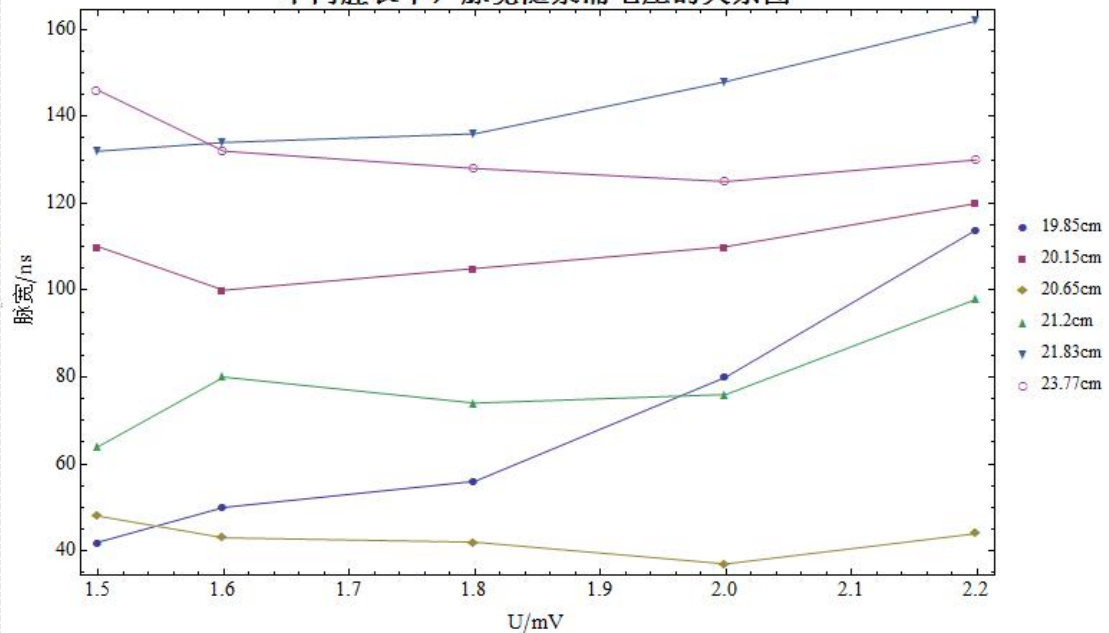


腔长：21.83cm
泵浦电压：1.50V

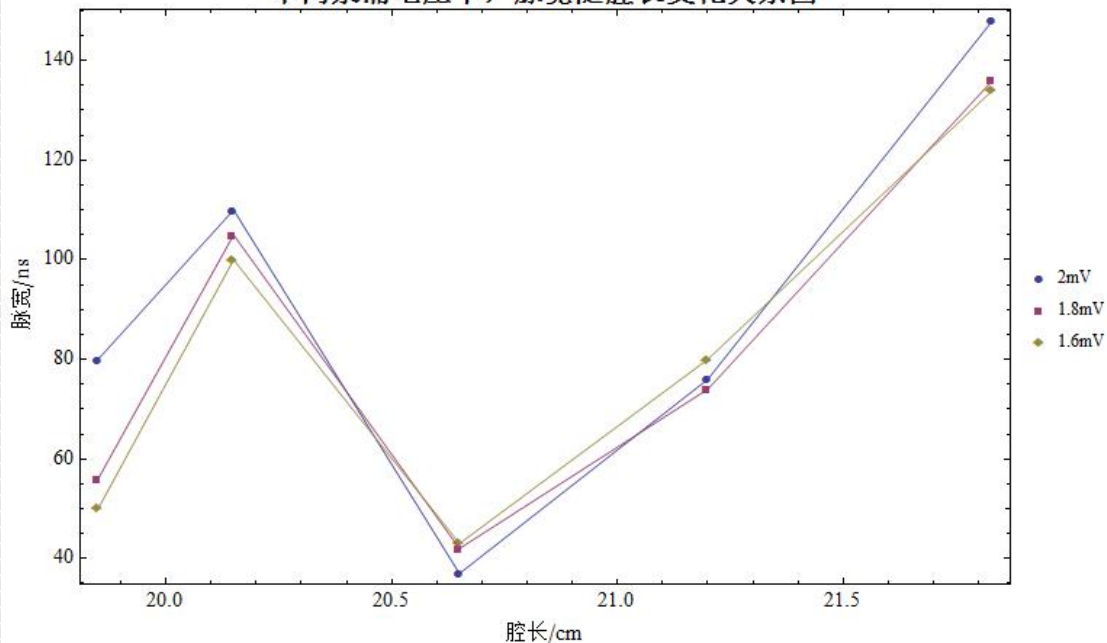
腔长相同时，**泵浦电压**越小，**脉宽**越宽，**峰值**越小

脉冲形状

不同腔长下，脉宽随泵浦电压的关系图



不同泵浦电压下，脉宽随腔长变化关系图



实验中还观察到：在一定腔长和泵浦功率下，稍稍转动激光输出镜的左右俯仰调节旋钮，略微偏离基模，示波器上显示的脉宽变小。

脉冲形状

- 脉宽正比于光子寿命 τ_R ，而 τ_R 与腔长 L 成正比，与腔内损耗成反比。
- 设产生激光的上下能级粒子数之比为 $\frac{\Delta n_i}{\Delta n_t}$ （粒子数反转程度）：
- 泵浦功率越大，该比值越大。
- $\frac{\Delta n_i}{\Delta n_t}$ 增大，腔内增益增大，腔内光子数的增长和反转数的衰减越迅速，脉冲的前后沿同时变窄，脉宽越小。

实际情况：腔内各处反转数分布不均，脉宽是各处脉冲的叠加。

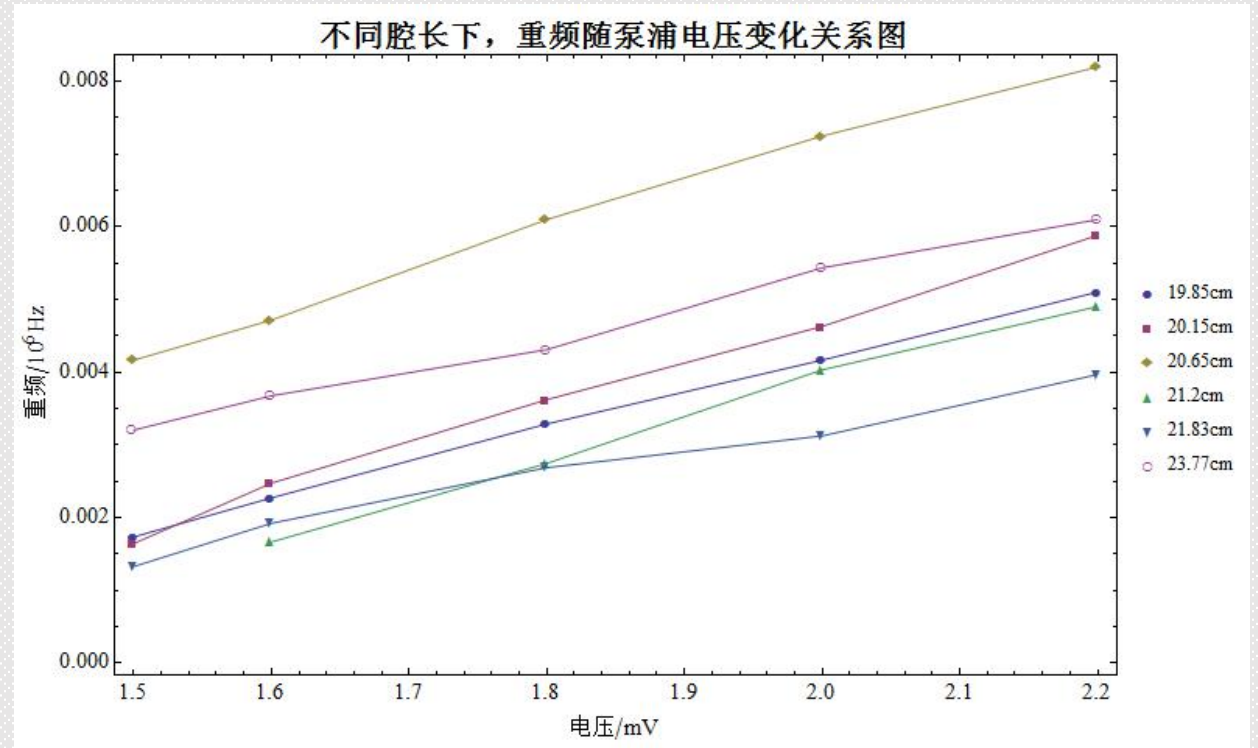
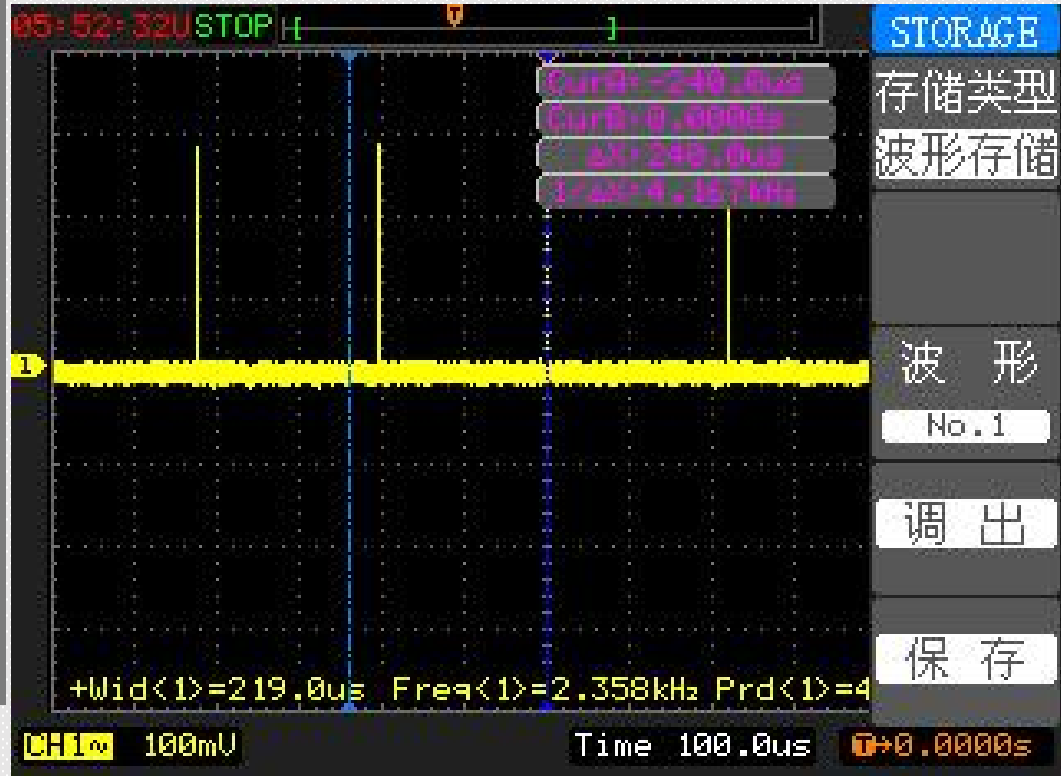
泵浦功率大时：泵浦中心反转数大，两侧小，叠加出脉宽较大。

泵浦功率小时：只有中心累计的反转数才能出光，所以脉宽反而小。

- 另外，由于输出镜被另一组实验同学暴力拆解并安装上，实验过程中，输出镜在自身应力下移动带来损耗的改变（该现象在另一块输出镜上被明显观测到）

脉冲周期

• 重复频率

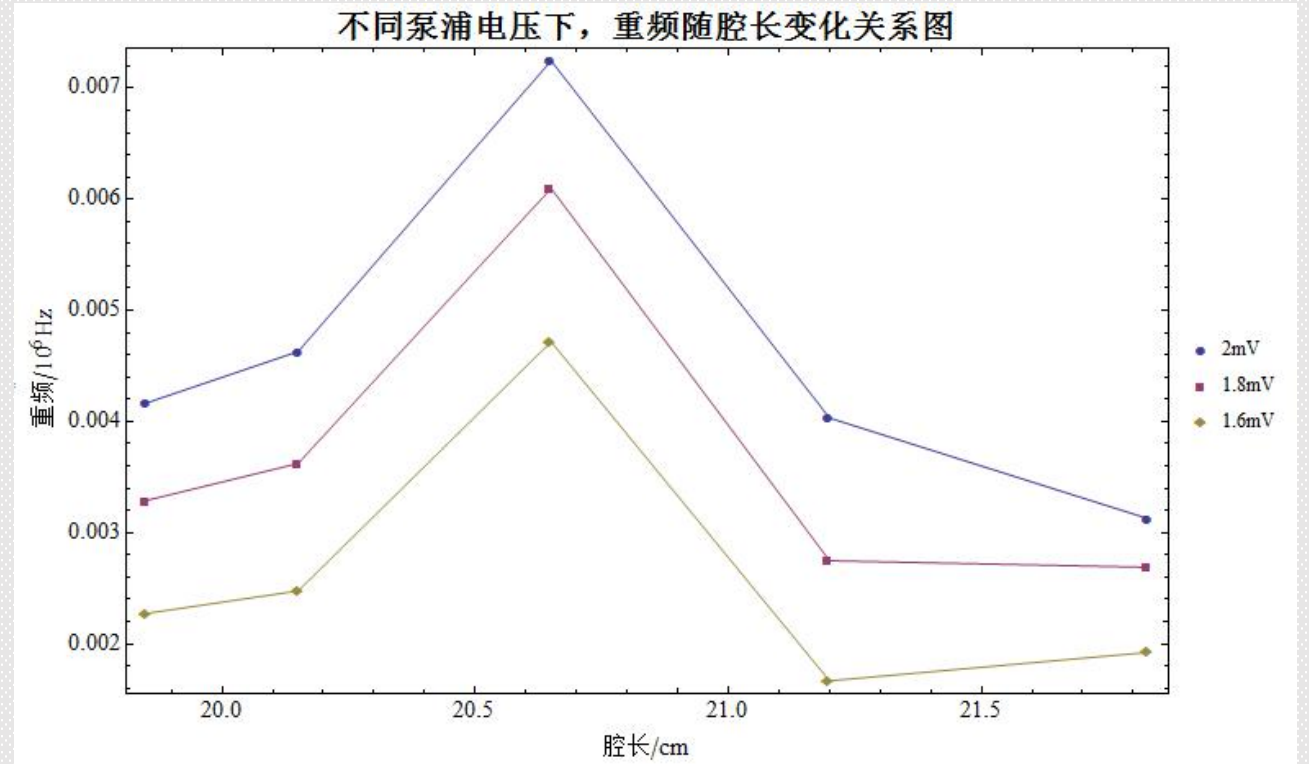


腔长一定时，重频随泵浦电压的变化几乎呈线性增大。

脉冲周期

电压一定时，重频随腔长的增大，先增大后减小，在20.65cm附近达到最大值。

| 腔长/cm | 斜率 |
|-------|------------------------|
| 19.85 | 0.0048(± 0.0001) |
| 20.15 | 0.0059(± 0.0002) |
| 20.65 | 0.0059(± 0.0002) |
| 21.20 | 0.0055(± 0.0003) |
| 21.83 | 0.0036(± 0.0003) |
| 23.77 | 0.0042(± 0.0002) |



重复频率与反转数从开始建立到到达阈值的时间有关

→ 泵浦功率

→ 光子寿命&损耗

参考文献

- 1、 Nissim Zafrani , Zachary Sacks, etc. Forty years of lasers at ELOP–Elbit Systems, Opt. Eng. 49(9), 091004 (September 09, 2010).
- 2、 Yuelong Fu, Jiang Li, etc, Effect of air annealing on the optical properties and laser performance of Nd:YAG transparent ceramics, OPTICAL MATERIALS EXPRESS 2108 October 2014 Vol. 4, No. 10
- 3、 半导体激光器输出特性的影响因素
http://wenku.baidu.com/link?url=gUPSJ2exoBo_HPRb_kPCVQqLx_0pQAyaHvnf1nGmWfwqWm5qJw6X3S7ovs1VmCV_-c3D4r2bmvopO3Bz-2AsBNMVsUrm8vN91YgSphYG2h7
- 4、 徐荣甫 , 刘敬海 , 激光器件与技术教程北京工业学院出版社 , 164页
- 5、 周炳琨,高以智,陈家骅,陈侗嵘.《激光原理》.国防工业大学
- 6、 金光勇,王慧.《半导体泵浦固体激光器技术》.吉林大学出版社
- 7、 大恒光电. 1-2 GCS-DPSL固体激光原理与技术综合实验.

Thank you



张笑颖 13307110540
施方正 13307110440