

用作激光 Q 开关的 LiNbO_3 晶体的加工和检验

杨功成 刘立人

(中国科学院上海光机所)

提 要

介绍了铌酸锂晶体(LiNbO_3)用作各种 Q 开关时的加工工艺和几种检验方法,讨论了晶体的质量指标之间的关系及其分级和选择。实验表明,用光轴干涉图来检验晶体的光学质量是简单而有效的。

激光电光 Q 开关目前常用铌酸锂(LiNbO_3)晶体和 XDP 类晶体。铌酸锂具有不潮解、横向调制、半波电压较低和容易制作电极等优点,加工、使用和维护都较方便。尤其用作不带起偏器的单块电光开关更具有多样化型式的特点^[1],较之 XDP 类等晶体简单有效,因而得到了广泛的应用。

铌酸锂是铁电晶体,室温下属于 3m 对称点群,负单轴光学晶体,波长 0.6 微米上寻常光的折射率 $n_o = 2.2967$,非常光的折射率 $n_e = 2.2082$ 。引上法生长,尺寸可以长到 $\phi 40 \times 100$ 毫米左右,需要单畴化处理,密度 4.64 克/厘米³,莫氏硬度为 5。

铌酸锂晶体的质量变动较大,为了满足各种应用的要求,达到正确使用和物尽其用的目的,必须对晶体的光学性能和电光性能进行检验,据此对晶体分级和选择。本文介绍了几种检验方法,但是着重讨论晶体各项参数之间的关系,寻求比较简单的方法供实际使用。



图 1 铌酸锂晶体的外形(沿 C 轴生长)

晶体的光学加工

LiNbO_3 晶体的加工与一般光学冷加工相同,顺序是:定轴——切割——研磨抛光。

1. 晶轴的确定

晶体的物理参考轴可以根据晶体外形的对称性初步定出(图 2)。沿光轴(z 轴)生长的

图 1 和图 12 照片分别由上海玻璃搪瓷所和本所晶体组提供。供给晶体样品的有: 999 厂、玻璃搪瓷所以及 601 厂、中国科学院硅酸盐所、905 厂、南京大学、801 所等单位。

LiNbO₃ 晶体是圆柱形体, 外侧有三条凸出的棱边。y 轴就在棱边方向上, x 轴与其垂直。严格的定轴应当用 X 射线法。但是, 在晶体光轴方向通光的激光调 Q 电光元件, 用偏光显微镜观察光轴图的方法来定光轴是简便的, 且能达到使用要求的精度。

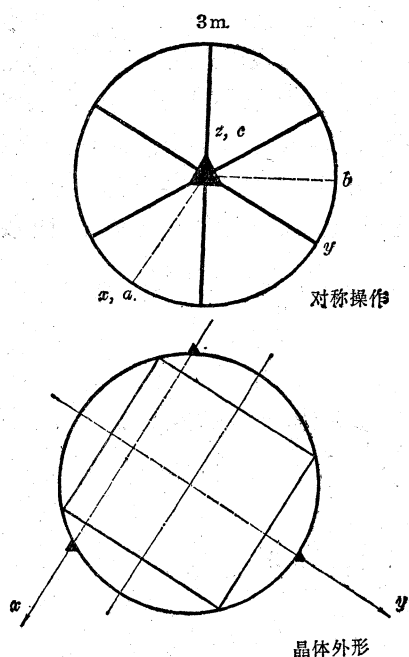


图2 晶体取向
a、b、c 为晶轴, x、y、z 为物理参考轴

按所需尺寸, 在晶体棒料上垂直于生长轴(光轴)切割, 用 150#~302# 金刚砂研磨两端, 用刀口平尺检查平度。两端面平行度用测角仪检查, 控制在 2' 以内。先用 303# 金刚砂细磨, 然后在毛呢快速抛光盘上用氧化铈粗抛亮一个面。在偏光显微镜下观察光轴干涉图(图 8)。转动显微镜工作台, 要求光轴图不随晶体而转动。如果光轴图转动, 说明两端面没有垂直光轴。根据光轴图偏向情况, 反复修正, 并保持两端面平行, 直到光轴图基本上不随晶体转动为止。用 X 光方法验证, 精度可达 5' 以内。

(2) 定 x、y 轴工艺

根据外形对称性, 连接两棱边就是 y 面(图 2)。切割后, 边研磨, 边用 90° 刀形角尺检查 y 面与两个 c 面的直角。精度控制在 3' 以内。用同样的方法切磨 x 面, 与其它各面的直角也均在 3' 以内。各平行平面的平行度保持在 2' 以内。这种简单的定轴方法角差不大于 3°, 在开关的实际使用中证明是可行的。

检验非抛光面的平行度时, 可在其面上紧贴平行平板, 再用测角仪测量。

2. 细磨和抛光

LiNbO₃ 晶体采用单只零件或一对零件胶合成一块加工操作。细磨抛光和一般光学玻璃相同。为了达到面形和精度要求, 晶体固定在石膏盘中, 并必须用硬度与晶体相差不大的垫片保护(图 3)。垫片最好用晶体的边角料, 也可用 K₉ 玻璃。

(1) 细磨

用 303#、303^{1/2}# 金刚砂在开有方槽的铜质磨盘上研磨。零件先用刀口平尺检查面形, 稍凸一些为宜。最后, 用放大镜观看晶体表面没有道痕和砂眼等疵病后再抛光。

(2) 抛光

抛光胶用沥青、松香和蜂蜡(或石蜡)配制。沥青与松香比为 1:1.5。在室温为 20°C 左右的情况下, 加入 5% 蜂蜡, 若室温稍低, 应适当多加

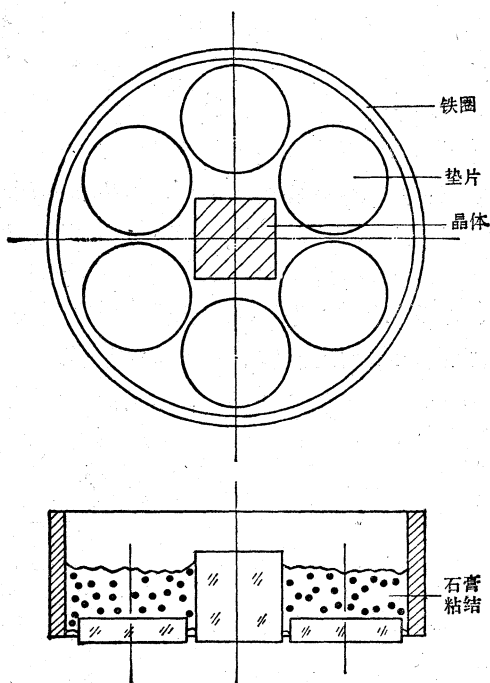


图3 石膏盘和晶体的固定

些蜂蜡。抛光盘上开方格小槽,间隔 10 毫米、宽 2 毫米、深 1 毫米。

抛光剂用 M_1 白刚玉微粉。为能抛出较好的光洁度,抛光过程中要保持抛光盘平滑并与零件密合。当晶体被抛亮到一定程度时,由于抛光胶容易在表面上出现亮道痕或白糊状麻点层,这时可用红外线灯适当加温,减淡抛光剂,同时在操作过程中适当加重压力。最后再加些悬浮液,光洁度还是可以抛好的。由于抛光剂较软,有时会出现油斑,可用 1:2 淡盐酸水溶液清除。 c 面抛光中还必须精确地修正光轴,使光轴图不转动。

晶体光学加工的要求与激光器腔内的光学元件相同。达到:表面平面性偏差的光圈数 $N = \frac{1}{2}$, 局部误差 $\Delta N = \frac{1}{5}$, 表面光洁度 $P = IV$, 平面平行度小于 $1'$, 定光轴精度小于 $10'$ 。要求太高也无必要,加工精度太低,引入腔内损耗并易于破坏。

3. 单块 45° 晶体的加工

单块电光 Q 开关有单 45° 和双 45° 两种(图 4)。先做好方形晶体, c 面基本上加工好。

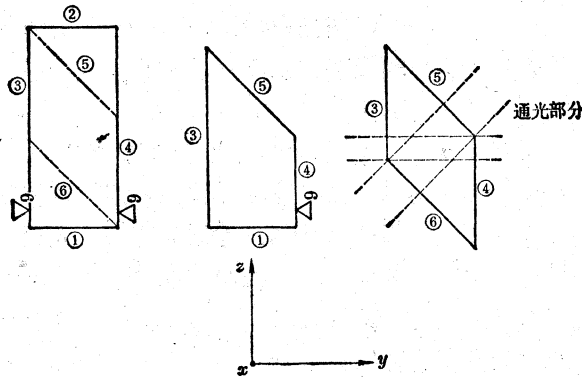


图 4 单块 45° 晶体的加工
(两 x 面 $\nabla 9$, 其余 $\nabla 14$)

(1) 单 45° 晶体

按图 4 先细磨抛光③面,与相邻的四个面应保持垂直,并控制在 $2'$ 以内。抛光后表面涂一层白蜡保护。再切割研磨一个 45° 角,角差和尖部塔差都在 $5'$ 以内。然后上石膏盘细磨抛光⑤面。上盘前在③面上用优质白纸封住,三边各留 0.5 毫米,并涂白蜡。注意防止蜡和水渗入(图 5)。留出空隙以便于用自准法检查尖部塔差。转动零件,注视测角仪中来自①和③面的反射象以测定角差。精度应达到:尖部塔差小于 $2'$, 45° 角差小于 $2'$ 。

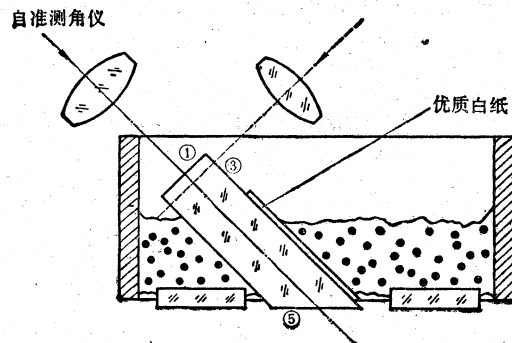


图 5 45° 斜面的抛光和加工

(2) 双 45° 晶体

将单块 45° 晶体再加工两个面(④和⑥面),即成双 45° 晶体。这时应保证有通光部分(图 4),可用自准法测量其平行度。

根据单块 Q 开关的原理,以及晶体质量上的双光轴现象,光轴定向和 45° 面的角度要求不必很高。但是,双 45° 开关的各对平行面,要求平行度尽量高些(小于 30'')。

晶体各通光面镀增透膜。两 ω 面上镀铬等金属作电极。

晶体的检验

衡量电光晶体调制器和 Q 开关性能的重要指标是晶体的消光比。消光比与晶体的折射率均匀性有关。在倍频、参量振荡器等激光非线性应用中,折射率均匀性(双折射)也是极重要的指标。由于生长等条件不同,常引起应力和组分的不均匀,加上在抛光和单畴退火过程中都要产生折射率不均匀,因此,晶体各个部位质量相差很大,必须加以检验。

1. 晶体消光比的测量

消光比定义为:在正交偏光镜下,晶体加电压时最大通光强度和加电压时通光强度之比。图 6 是实验装置。为方便起见,使用氩-氖激光器($\lambda=6328$ 埃)作光源,要求其发散角和光束直径均较小。光阑用于改变光束直径。一般测量时直接用谐振腔长 250 毫米的单模激光束。偏光镜最好用正交时本身能完全消光的尼科尔棱镜。光电探测器采用线性范围大的硅太阳能电池。指示用的光点反射式检流计的内阻要小,为保证足够的测量范围,最好能换档,以扩大量程。

表 1 是一些晶体的测量结果。

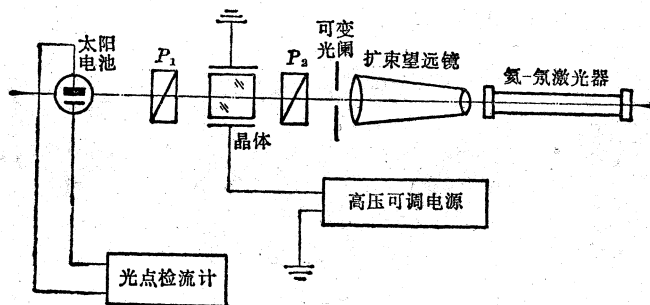


图 6 晶体消光比的测量装置示意图

(P_1 、 P_2 为正交偏振镜,电压加在 LiNbO_3 晶体的 x 轴上, $x(y)$ 方向与 P 方向一致)

表 1 LiNbO_3 晶体消光比的测量(直接用腔长为 250 毫米的单模氩-氖激光器)

编 号	尺寸 $x \cdot y \cdot z$ (毫米)	消 光 比 (E)	备 注
1	19.19.18.4	~1000	深棕色
2	19.19.5.28	250	深棕黄色
3	18.5.18.5.27.5	185	无色透明
4	19.19.33.6	180	淡 黄
5	15.15.32.7	170	棕黄,稍带绿
6	10.10.23	45	黄绿色

晶体消光比在通光截面各处数量不同, 电光性能是不均匀的。一般中心较高。用 1# 和 3# 样品作了消光比和通光口径的定量测量(图 7)。

随着口径增大, 消光比迅速下降。由于口径平均效应而渐趋恒定。在 $\phi 4 \sim 6$ 毫米的常用 YAG 激光棒的口径上, 由图 7 可见, 消光比已近最低值。用作 Q 开关时, 有效消光比要比表 1 中的数据小得多。

除了这种主动消光比外, 还可测量被动消光比, 即晶体不加电压, 转动检偏镜, 得到偏振镜对平行时的最大光强与正交时的最小光强之比。被动消光比一般大于主动消光比。比较几种通光口径下的主动和被动消光比, 更能判断晶体的电光质量。

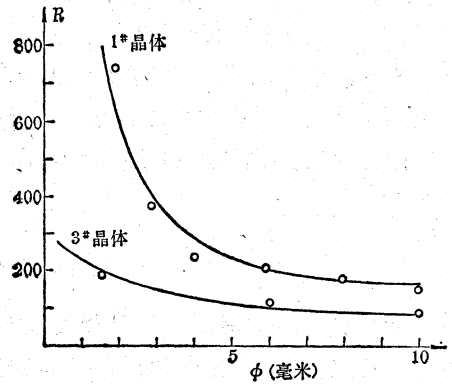


图 7 消光比与通光口径的关系

2. 光轴干涉图的观察

晶体寻常光折射率沿光轴的不均匀性在光轴干涉图上反映为光轴图产生了双光轴露头现象或图形的不规则。除用偏光显微镜外, 图 6 装置中在晶体前加一块短焦距透镜, 也可方便地观察光轴图。图 8 是表 1 中晶体样品的光轴干涉图。

可以看到, 干涉图越对称, 即十字线分离越小, 消光比就越高。

从光轴图上可测量寻常光折射率的不均匀性。类似地用电致双折射出现的双光轴露头的公式及说明暗环位置的公式^[2], 可导出如下关系:

$$\Delta n_0 = \frac{\lambda}{l} \left(\frac{\Omega}{\theta_\lambda} \right)^2 \quad (1)$$

其中, Ω 为光轴露头角, θ_λ 为第一个暗环的偏轴, l 为晶体光轴方向上的长度(均见图 9)。光轴图上略有双轴现象时, $\Delta n_0 \sim 10^{-6}$ 。

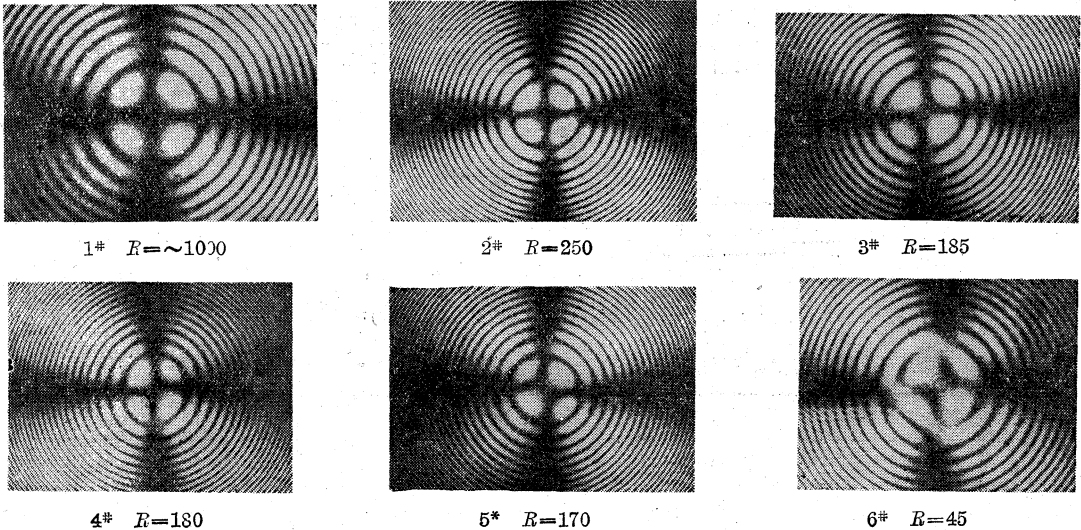


图 8 各种晶体的光轴干涉图(R 为消光比)

3. 折射率均匀性

晶体折射率均匀性一般用台曼—格林干涉仪或沙敏干涉仪测量。这里采用一种类似沙敏干涉仪的简单方法, 只用一块厚约 3 厘米的玻璃块, 晶体两表面上反射回来的平行光经玻璃块

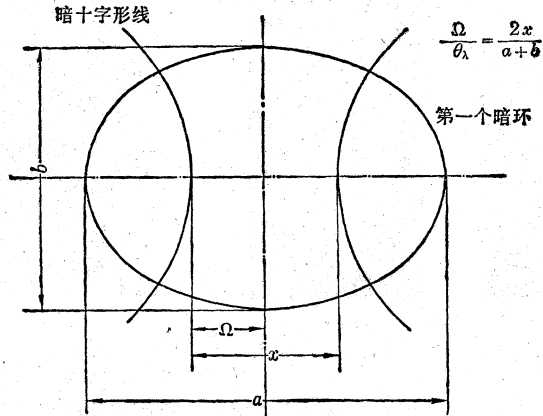


图9 光轴方向折射率不均匀性的测量

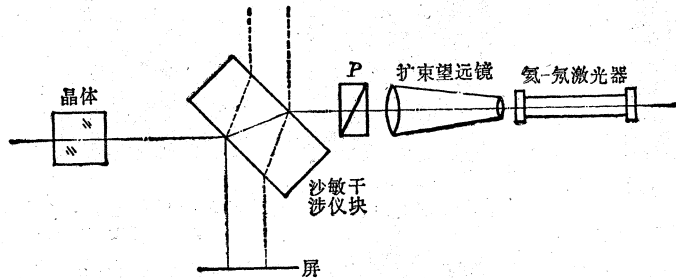


图10 折射率均匀性的观察

表面再反射到屏上, 显示出干涉花样(图10)。

偏振镜用于选择测量光的偏振态, 与需要测量的是寻常光还是非常光折射率有关, 应分别使它与相应晶体主轴一致。玻璃块的放置要注意使入射面与偏振振动方向一致或垂直, 防止测量光透过玻璃块后偏振态发生变化。

折射率均匀性(平均值)可表示为^[3]:

$$\frac{\partial n}{\partial z'} = \frac{\lambda}{2l} \frac{N}{z'} \quad (2)$$

其中: z' 为最大条纹变化方向的长度, N 为其方向上黑白条纹的对数, l 为通光厚度。

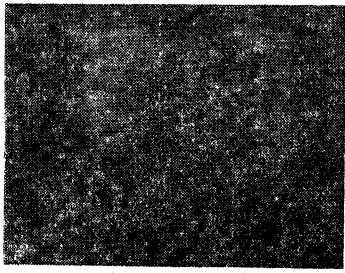
4. 双折射均匀性

寻常光折射率和非常光折射率均匀性之差就是双折射均匀性。用图6装置直接观察平行光在正交偏光镜下的干涉图甚为方便。此时光束沿晶体 $x(y)$ 轴入射, 主轴与偏振镜的振动方向成 45° 角。

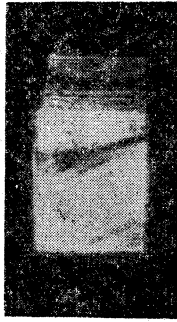
双折射均匀性表示为^[3, 4]:

$$\frac{\partial(n_o - n_e)}{\partial z'} = \frac{\lambda}{l} \frac{N}{z'} \quad (3)$$

沿光轴放置时, 也可观察其均匀性。各样品折射率均匀性的花样见图11。双折射均匀性以 $3^{\#}$ 晶体为例: 双折射图中沿生长方向的条纹变化最大, 计数约有10对。按(3)式代入各尺寸, 便得双折射均匀性为 $\partial(n_o - n_e)/\partial z' \approx 1.1 \times 10^{-4}$ 厘米⁻¹。可以看到, 消光比越高, 晶体越均匀。



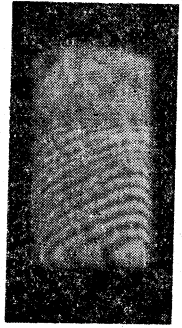
1# 晶体, c 轴入射, 平行光正交偏光镜干涉图



$n_o - n_e$

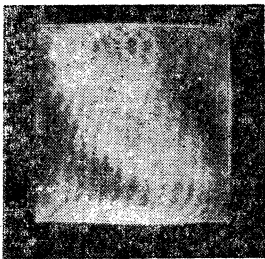


n_o



n_e

2# 晶体, y 轴入射, 截面 9×11 毫米², 厚 9 毫米, 双折射均匀性 $\sim 7 \times 10^{-5}$ 厘米⁻¹ (照片上端的细条纹不是晶体部分)



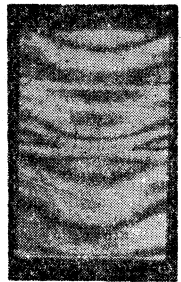
3# 晶体, c 轴入射, 平行光正交偏光镜干涉图



$n_o - n_e$

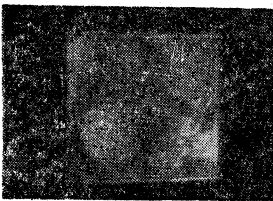


n_o



n_e

3# 晶体, x 轴入射, 截面 18.5×27.5 毫米², 厚 18.5 毫米, 双折射均匀性 $\sim 1.1 \times 10^{-4}$ 厘米⁻¹



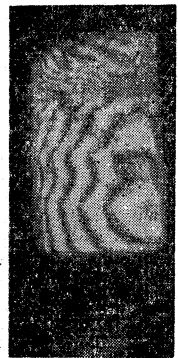
6# 晶体, c 轴入射, 平行光正交偏光镜干涉图



$n_o - n_e$



n_o



n_e

y 轴入射, 截面 10×11 毫米², 厚 10 毫米, 双折射均匀性 $\sim 2 \times 10^{-4}$ 厘米⁻¹ (照片上端的细条纹不是晶体部分)

图 11 一些晶体样品的均匀性测量(尺寸见表 2)

晶体消光比、光轴干涉图和双折射均匀性实验也证明是相一致的, 都可以用来检验晶体的光学质量。我们将实验所用的 LiNbO_3 晶体按消光比、光轴图和双折射分为四类(表 2)。从中可以清楚地看到它们之间的关系。在 Q 开关应用中主要考虑晶体消光比, 而在倍频及参量振荡等应用中则主要考虑其双折射均匀性。但是, 测量晶体的这两项指标必须先把晶体完全加工好, 很费工时。一旦质量不好, 将造成大量浪费。由于光轴干涉图能反映晶体质量, 加工时也只需抛亮一个 c 面, 因此观察光轴干涉图进行初选晶体的方法是简单而可靠的。

要有良好的调 Q 性能, 必须对电光晶体和激光工作物质提出质量要求。

表2 LiNb₃ 晶体分类

分 类	光 轴 消 光 比	光 轴 干 涉 图	双折射均匀性 c (厘米 ⁻¹)
高 质 量	~1000	严格对称	$\leq 5 \cdot 10^{-5}$
中 高 质 量	~250	稍许有些双光轴头现象	$\sim 5 \cdot 10^{-5}$
中 低 质 量	~200	有明显的双光轴现象	$\sim 10^{-4}$
差	~50	光轴图混乱	$\geq 2 \cdot 10^{-4}$

消光比反比于光束发散角的四次方和光轴长度的平方^[5]。因此激光器的发散度将严重影响 Q 开关的调制度。实验中观察到折射率均匀性不同的 YAG 棒, 调 Q 性能效果也不同。图 12 是几根 YAG 棒在沙敏干涉仪上的干涉图。激光棒的干涉条纹要求尽量少而平直, 这样的激光器方向性较好, 调 Q 效果和单脉冲性能也好。条纹很混乱的棒在调 Q 中是关不死的。实验发现, 消光比大于 150 就能做出 Q 开关。消光比小于 100 的开关是关不死的。如果要求严格消除前置和后置脉冲, 消光比应尽量大于 200。当然这也和 Q 开关结构、泵浦能量、器件阈值等有关。

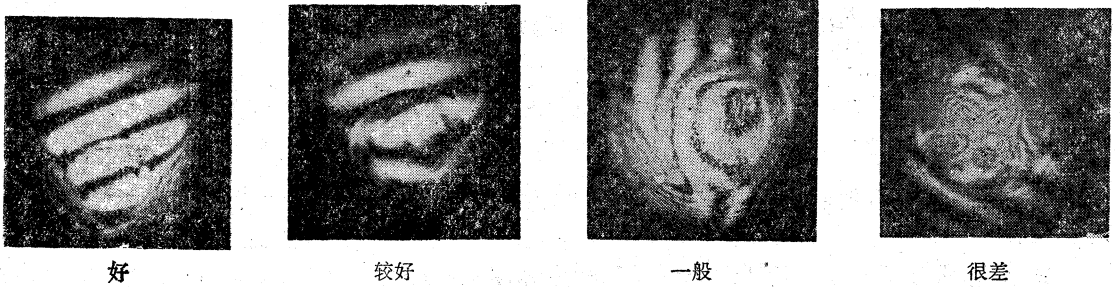


图 12 YAG 棒在沙敏干涉仪上的干涉图($\lambda=6328$ 埃)

这里也可看到, 消光比的数值与测量系统有关, 因而只有相对比较的意义。本文所用的消光比是根据我们自己的系统而定的。随着通光口径的增大, 消光比将大大降低。条件允许的话, 应使用高质量的棒, 直径一般以 $\phi 4 \sim 6$ 毫米为宜。为了使激光棒中有较大的储能以便在调 Q 时释放出较高的单脉冲功率, 不妨选用阈值稍高的棒。此外, 晶体也不应太长, 以免降低消光比, 一般取 10~30 毫米左右。

应当指出, LiNbO₃ 晶体存在三种破坏: 光感生折射率变化, 即光损伤; 热应力引起粉碎性破坏; 强光脉冲造成表面烧焦和烧坑, 或内部出现裂缝和气泡。实验所用的 LiNbO₃ 晶体在 YAG 调 Q 激光器件中只出现第三种破坏。激光的平均功率密度为 500 兆瓦/厘米² 时, 一次就会产生表面破坏, 平均功率密度低于 5 兆瓦/厘米² 时, 不会发生破坏。一般使用的功率密度为 50~100 兆瓦/厘米², 这时, 由于激光光斑不均匀, 在高重复率(40 周/秒以上)使用时可能在表面上或单块 Q 开关的第一个内反射面上出现几点破坏。但长期工作中并不蔓延开, 不影响输出激光功率。

参 考 资 料

- [1] 上海光机所, “激光单块晶体 Q 开关”(上海科研单位成果展览会技术资料)上海市科学技术交流站。
- [2] 同[1], 见公式 1~(16) 并用变换 $n_0^2 E \rightarrow \Delta n_0$, 公式 1~(11) 并代入 $m_0=1$ 和 $\theta=\theta_\lambda$, 再相除。
- [3] J. E. Midwinter; *Appl. Phys. Lett.*, 1967, **11**, 128.
- [4] K. Sugibuchi et al.; *Appl. Phys. Lett.*, 1968, **13**, 107.
- [5] Ю. Э. Камач и др.; *ОМЛ*, 1972, No. 8, 14.