

感应加热提拉法生长 YAG 单晶的温度控制

钇铝石榴石 研究组

(中国科学院物理研究所)

为了得到结构完整、内部光学均匀的高质量晶体，在生长过程中除了寻找一个合适的化学组分和适宜的结晶条件外，对热场温度的高精度控制是重要条件之一。热场温度波动大致可以分为两种类型：一种是由于所使用的各种元件的老化，温漂等原因形成的对给定值的缓慢漂移；另一种是各种外界干扰因素造成的温度瞬时波动。实践证明，对晶体质量影响最大的是温度的突变。以 YAG 晶体为例，在生长过程中温度突变较大的时候，在晶体相同的部位上外形直径会有变化，内部质量变坏。然而，缓慢的外形变化，则不易带来太大的影响。因此，对单晶炉热场温度控制，应该着重于防止各种干扰因素造成的温度突变。

我们认为，对温度波动影响最大的是电加热功率。例如外电网电压频繁的大幅度的瞬时变化、高频发生器工作状态的变化等，都会带来大幅度的干扰。因此对于生长单晶来说，温度控制的重点应该放在克服高频电功率突变造成的干扰上。

我们采用控制高频电功率输入的方法来控制温度，通过长时间生长 YAG 单晶的检验，得到了较为满意的结果。此方法的关键在于快速、准确地取出电加热功率信号。由于高频发生器通到感应圈的高频电流馈线上有很强的高频电流通过，并且在馈线的周围空间存在着很强的高频电磁场，因此在高频馈线附近安装一个拾波线圈，线圈两端将会出现与高频馈线中通过的高频电流成比例的感生电压，它的频率和波形同高频馈线中通过的电流是一致的。

对于采用三相半控桥整流作直流高压的高频振荡电路，高频电压的平均值是：

$$V_{cp} = \frac{3}{2\pi} \int_{\theta-\frac{\pi}{3}}^{\theta+\frac{\pi}{3}} \sqrt{2} V_{AM} \sin \omega_M t d(\omega_M t),$$

$$\text{其中 } V_{AM} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} V_{AO} \sin \omega t d\omega t.$$

式中 ω 是高频振荡的角频率， ω_M 是三相交流电流的角频率， θ 是控制桥的调节角。

而高频电压的平均有效值则是：

$$V_H = \sqrt{\frac{3}{2\pi} \int_{\theta-\frac{\pi}{3}}^{\theta+\frac{\pi}{3}} (\sqrt{2} V_{AM} \sin \omega_M t)^2 d(\omega_M t)}.$$

从上面两式可以看出，如果直接用拾波线圈的电压作控制信号，必须满足这样两个条件：(1) 高频发生器输出的电压波形应是比较规则的正弦波，谐波成份和寄生振荡成份应尽量少；(2) 功率调整只能采用调整电压振幅的方式(这时调节角 θ 是 0, V_{cp} 和 V_H 是成比例的)，而不能用调节导通角的方式。对于较大功率的高频发生器，波形畸变和寄生振荡都较为严重，用平均电压信号来代替有效值信号将会带来很大的误差。为此，我们把拾波线圈取得的电压信号进行有效值转换，即保存了功率控制信号灵敏、快速的优点，又使得信号准确，还可以用可控硅、闸流管作执行元件，从而进一步提高了控温设备的性能。

我们采用 DL-3 型热偶规管作电压-功率转换元件。图 1 是 DL-3 型热偶规管的输入-输出特性曲线，

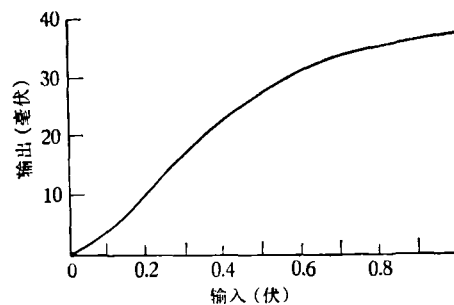


图 1 DL-3 型热偶规管输入-输出特性

图 2 是动态特性曲线。从图 1 可知，输出为 5—15 毫伏一段斜率最大，线性较好，热丝工作温度低，因此寿命较长。我们选取在晶体生长时热偶电动势输出为 10 毫伏左右的一段。由于热偶规管的加热丝和电偶丝直径都很细，并且封在真空中，因此系统的热容量很小，反映速度较快。从图 2 可知，热偶规管是较标准的一阶器件，时间常数为 10.6 秒。

在感应炉处于正常生长 YAG 单晶的温度下，用

铌铯热电偶、硅光电池 (2CR-64 型) 测温元件作了比较。各检测元件的输出信号电压用 ZF-69 型直流放大器经过差值放大后送到 LZ3-204 型函数记录仪记录。测量时, 先将系统升温到生长状态并长时间恒温, 待系统

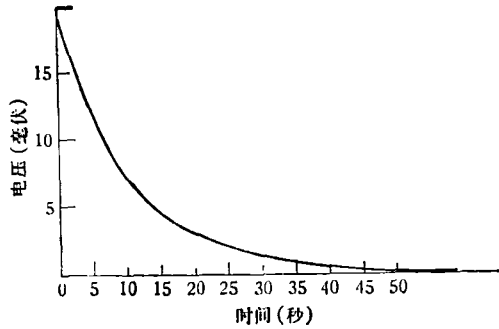


图2 DL-3 型热偶规管动态特性
温度平衡后, 以最快速度升温或降温 (升降过程约为几秒) 造成阶跃式的干扰, 同时记录各检测元的飞升曲线。

从图3(a)、(b)可以看出, 在平衡状态下, 当干扰出现时, 几种检测元件对炉内温度波动状况的反应是一致的。但热偶规管最为及时、灵敏。这是由于它的时间常数小, 没有测量滞后。本来, 热电偶和硅光电池元

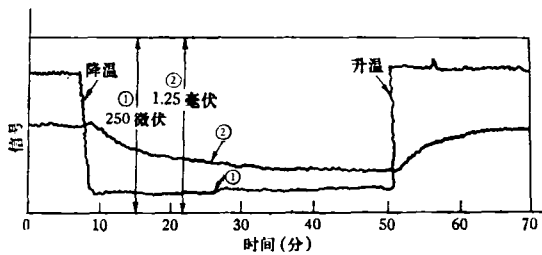


图3 (a) 热偶规管(曲线①)和硅光电池(曲线②)的动态特性曲线。曲线①比曲线②的时间坐标原点超前0.5分钟

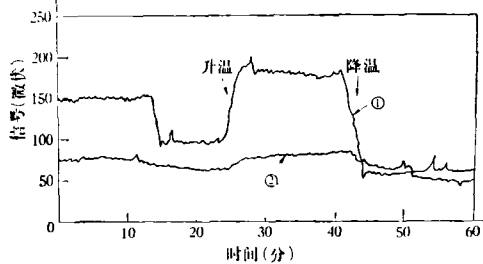


图3 (b) 热偶规管(曲线①)和依铯热电偶(曲线②)的动态特性曲线。曲线②比曲线①的时间坐标原点超前0.5分钟

件本身的时间常数都不大, 响应应该是灵敏的。但是一个热系统的时间常数是系统的热容量与热阻的乘积。晶体生长时, 由坩埚、熔体、保温材料等组成的整个系统的热容量是很大的; 因此造成安装在炉内的铌铯热电偶和硅光电池检测系统的时间常数大。按图3(a)的曲线求出所用硅光电池检测系统的时间常数为8.5分; 从图3(b)求出的铌铯热电偶检测系统的时间常数也差不多

是这样。由于热偶规管检测系统的时间常数常比炉内整个系统小得多, 因此当干扰出现后, 能及时地发出偏差信号到执行系统进行调节, 在生长界面的温度发生显著变化之前, 把温度调回到原给定值, 这样就提高了控温精度。

图4 为整套装置闭环控制的原理图。

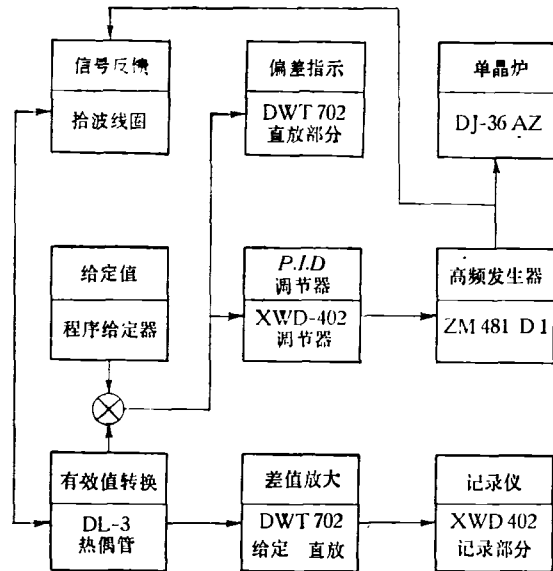


图4 闭环控制回路原理

信号检测包括拾波线圈和有效值转换两部分。拾波线圈的结构见图5(a)。线圈装在高频电流馈线地线一侧, 并要避免引出线与高压侧碰上, 以保证安全。在拾波线圈与热偶规管之间用一空心变压器作隔离和阻抗匹配, 它的结构见图5(b)。热偶规管和空心变压器都装在一个充满变压器油的杜瓦瓶中, 以减小环境温度带来的影响。

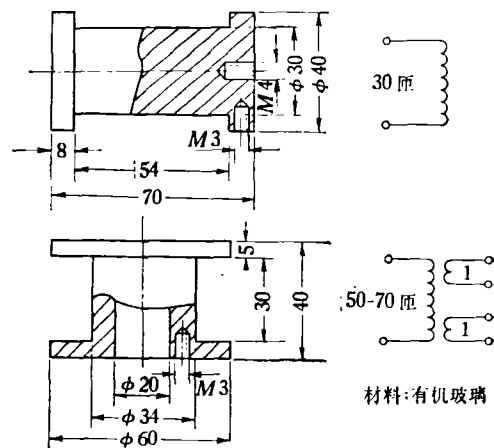


图5 拾波线圈(a)和空心变压器(b)结构

调节器使用XWD-402型自动电子电位差计所附带的P·I·D电动调节器。从使用效果看,抗干扰能力、稳定性、可靠性和精度都比较满意。也可以使用DDZII系列其它型号的调节器。但目前常用的DWT-702型控制仪的某些参数不好匹配,显得不够稳定。

本控温系统,在我们的条件下,调节器参数整定为 $\delta = 30\%$,当 $I \rightarrow$ 数秒, $D \rightarrow$ 数秒时,调节周期大约为2秒,具有足够的稳定性。在恒温状态下用铂铑热电偶测量,瞬时的温度波动小于3微伏,相当于0.5度以下。长时间的缓慢漂移大些,约为2—3度。硅光电池的记录曲线表明,在信号输出为80毫伏时,恒温区间波动在10微伏以内。使用这套温度控制系统,得到了外形和内部质量都很好的YAG单晶体。

本温度控制器的结构简单,使用标准系列的调节器,调整容易,工作稳定可靠。由于整套装置都在炉外,与生长装炉情况无关,重复性也较好。

本装置对于其它使用感应炉并要求作精密控制的装置也完全适用。同样的原理对于电阻炉也可以使用。

需要注意的是,由于采用电加热功率作信号,对于晶体逐渐拉长和散热条件逐步变化而带来的温度变化,在本控温系统中没有响应。因此在生长过程中,需要随着晶体的长度变化作出适当的修正,以保持晶体等径。修正量的大小,目前还需要操作者通过观察和经验,由程序给定器来实现。对于全自动的等径控制,需

要加上其他反映直径变化的信号,例如称重法来实现。然而,由于它具有反应快、精度高的特点,所以正好可以作为称重法串级调节的副环来使用。

附: 简易程序给定器

晶体生长过程中,根据生长情况,经常要求不断地升降温。通常使用程序给定器来实现这一要求。这样既可以减轻操作人员的负担,又可以比手动操作准确、细致,有利于提高晶体质量。目前国内已有各种采用数字电路来实现的程序给定器,这里仅从简单、实用的角度出发,介绍一种简易程序给定器线路。使用SD-02或TBR-2型电动机来带动精密多圈电位器实现数模转换。为了减小“台阶”,马达采用脉冲供电方式,每动作一次,导通一个周波(20毫秒),电机转2.5度。调节两次脉冲的间隔时间,就可以得到范围很宽的升降速度。原理如图6所示。图6中的元件参数见表1。线路基本上是由一个单结管构成的脉冲发生器产生尖脉冲,通过后面的一个单稳线路整形得到一定宽度的脉冲,然后打开可控硅给马达供电。在单结管BG₁上加了一个50周的同步信号,以保证马达导通时间每次一致。改变R₂的阻值可以使脉冲间隔由每秒5次直到每小时2次的范围内变化。通过波段开关倒接马达绕组以改变转动方向来实现升降温控制。考虑到高频干扰特别强,线路也注意了抗干扰问题。

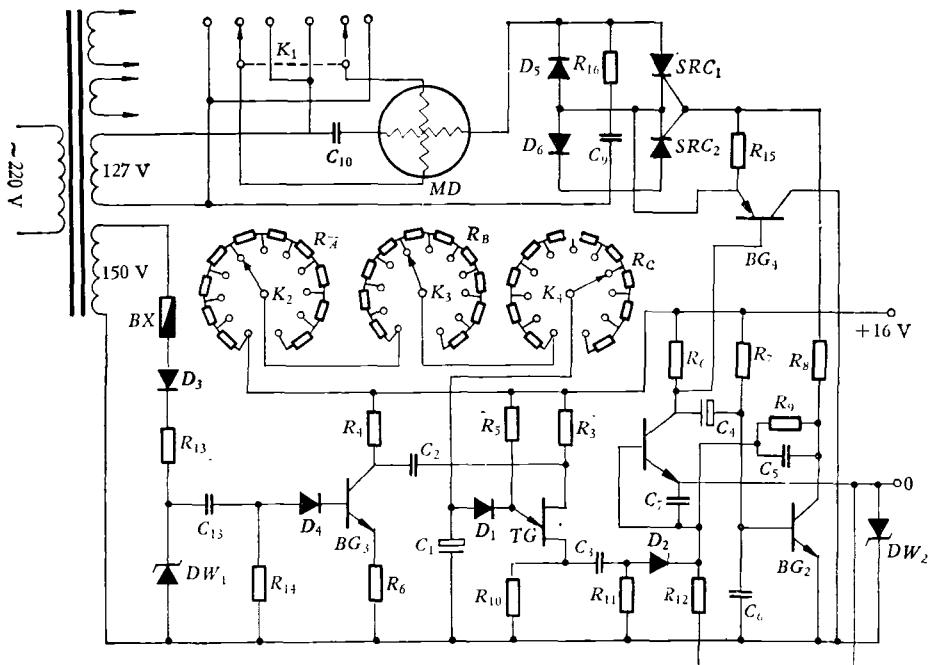


图6 简易程序给定器电路原理图

表1 简易程序给定器元件参数

元 件	参 数	元 件	参 数	元 件	参 数	元 件	参 数
R_2	10兆欧姆	R_{13}	20千欧姆	C_7	1000微微法拉	D_3	2CP21F
R_3	150欧姆	R_{14}	5.1千欧姆	C_8	0.1微法拉/470伏	D_4	2AP15
R_4	2.4千欧姆	R_A	10×4.7 千欧姆	C_9	2400微微法拉/500伏	D_5	2CZ13G
R_5	510欧姆	R_B	10×47 千欧姆	C_{10}	1微法拉/400伏	D_6	2CZ13G
R_6	1.5千欧姆	R_C	10×470 千欧姆	BG_1	3DK4C	DW_1	$2 \times 2CW21K$
R_7	10千欧姆	C_1	200微法拉(钽电容)	BG_2	3DK4C	DW_2	2CW21C
R_8	1.5千欧姆	C_2	0.022微法拉	BG_3	3DK4C	SRC_{1-2}	3CT5/800伏
R_9	4.7千欧姆	C_3	0.1微法拉	BG_4	3AX25	BX	0.2安
R_{10}	27欧姆	C_4	3—5微法拉	TG_1	BT33	MD	SD-02马达
R_{11}	36千欧姆	C_5	30微微法拉	D_1	2AP15		
R_{12}	27千欧姆	C_6	0.47微法拉	D_2	2AP15		

CO₂ 激光器平凹谐振腔的实验选择

南开大学物理系光学专业 CO₂ 激光组

对于封离式 CO₂ 激光器，目前大多采用平凹谐振腔，即输出镜为锗平行平面镜(一般不镀膜)，全反射镜为镀金凹面镜。考虑到放电管的直径和长度以及锗镜两反射面的平行度，凹面反射镜取多大的曲率半径才能得到谐振腔的最佳匹配，从而得到最大的基模激光功率输出呢？对以上问题我们进行了实验选择，得到的结果是，当凹面镜的曲率半径 R 为腔长 L 的1.3至2.3倍时，都可以得到较大的基模功率输出。

做实验用的激光器的凹面反射镜是可调可更换的。因而每更换一个凹面反射镜，都可以调得相应的最佳耦合，并调节激光器的工作电流，测得相应的最大输出功率。

对于这个结果，曾在两只长度相差很大的激光器上得到。我校七一届学员的毕业实践工作所用的激光器腔长2米，放电管内径12毫米，最大输出功率130瓦；七二届学员毕业实践工作所用的激光器腔长450毫米，放电管内径6毫米，最大输出功率12瓦。在这两个实验中所得的输出功率与凹面反射镜的曲率半径的关系规律是完全一致的。下面仅就两米长激光器的结果进行分析。

图1是 CO₂ 激光器输出功率与凹面镜曲率半径 R 的实验曲线。由图1可以看出，对于2米腔长的激光器， R 在2米以下时，属于非稳定腔，输出功率迅速下降， R 在2.5米到4.5米之间时，功率输出达到极大值，同时光斑模式基本上是基模。当 R 再增大时，不但输出功率降低，而且模式也变得很坏。

根据谐振腔的理论计算， R 越大，模体积越大，输

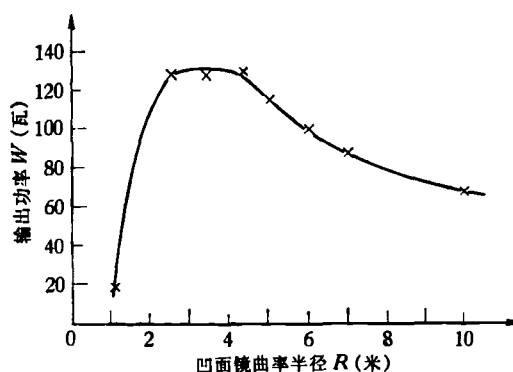


图1 CO₂ 激光器输出功率与凹面镜曲率半径 R 的实验曲线 (腔长2米, 放电管内径12毫米, 锗镜两面平行度误差30秒)

输出功率越大。 R 为10米的模体积为 R 是2.5米的模体积的两倍，但实验结果的输出功率却与此相反。另外，两者在凹面镜上的光斑尺寸均为4.1毫米，它们对于同一个放电管的口径应有相同的选模效果。但是 R 为2.5米时能得到基模输出，而 R 为10米时，则为杂模输出。

我们知道，当 R 增大时，谐振腔的衍射损失增大，但这个增大的量，对于实验中所选用的 R ，只差百分之几。而 R 为10米时与 R 在2.5米与4.5米之间时输出功率相差40%左右。因此认为在谐振腔的损耗中，逸出损耗为主。

在理论计算中，只涉及锗镜的一个表面。实际上对于不镀膜的锗平行平面镜来说，它的两个表面对于激光振荡都是有贡献的。而在实际加工中，又不可能使