

編 号: (77)009

內 部

来华技术座谈资料

(1976 年 英 展)

恰克拉斯基法生长晶体

中国科学技术情报研究所

T-2

目 录

一、概况.....	(1)
二、Malvern单晶炉结构特点.....	(1)
(一) 概述.....	(1)
(二) 主要技术指标.....	(2)
(三) 马尔温 (Malvern) 型提拉单晶炉特点	(3)
1. 晶体称重法自动控制晶体生长.....	(3)
2. 高压生长室介绍.....	(7)
三、磷化镓晶体生长.....	(9)
(一) 磷化镓的合成.....	(9)
(二) 磷化镓单晶的生长.....	(9)
(三) 晶体质量.....	(11)
(四) 磷化镓单晶的应用.....	(11)
四、其他晶体的生长.....	(12)

一、概 况

1976年11月17日~27日,英国48家集团在北京举行广播设备、雷达和检测仪表展览会,英国金属研究有限公司展出一台马尔温(Malvern)型提拉单晶炉,并由该公司的地区营业主任丹尼斯·温格罗夫和我国的技术人员就有关晶体生长和单炉结构、控制等方面的问题进行了座谈。

金属研究公司(简称MR公司)有近20年的厂史,开始以研究各种单晶材料为主,后来扩展到研制单晶生长设备和单晶的切、磨、抛等设备。

1975年,金属研究公司与剑桥仪器公司合并,统称剑桥仪器公司,但仍然分两家名义对外出售产品,如晶体生长设备和材料研究设备仍以金属研究公司的名义出售。两公司合并后有职工1000多人,其中剑桥仪器公司700多人,金属研究公司300多人。

金属研究公司的许多工作是在英国皇家雷达公司(简称R.R.E)研究的基础上发展起来的,这两家在技术上一直保持联系,例如用晶体称重法控制单晶直径就是R.R.E的研究成果。R.R.E公司在英国的马尔温(Malvern,)属政府研究机关,那里有一个单晶直径自动控制研究组和生长GaP和其他单晶材料的研究小组,经常在杂志上发表文章。

金属研究公司生产的提拉单晶炉有如下特点:

(一)工作室可以互换,因而可用于真空、低压、高压(可达200大气压)下生长单晶,特别是能在高压下生长易离解的Ⅲ-V族等化合物半导体,如GaP等单晶。

(二)具有用晶体称重法控制直径的装置,这在国际上也是比较先进的直径自动控制方法。

(三)有高频加热和压阻加热两种型式,近两年来由于采用压阻加热而增大了每炉的装料量,因此用此种单晶炉已拉出 $\phi 50\text{mm}$,重2 kg的GaP单晶,晶体质量也有所改进。

由于具有这些特点,这种单晶炉已广泛销售欧洲、日本、美国等地,去年越南也进口一台这种晶炉。但这次展出的这种单晶炉,其关键部分,如高压工作室和直径自动控制部分都未带来。现将参观和座谈的内容分述如下:

二、马尔温型(Malvern)单晶炉结构特点

(一)概述

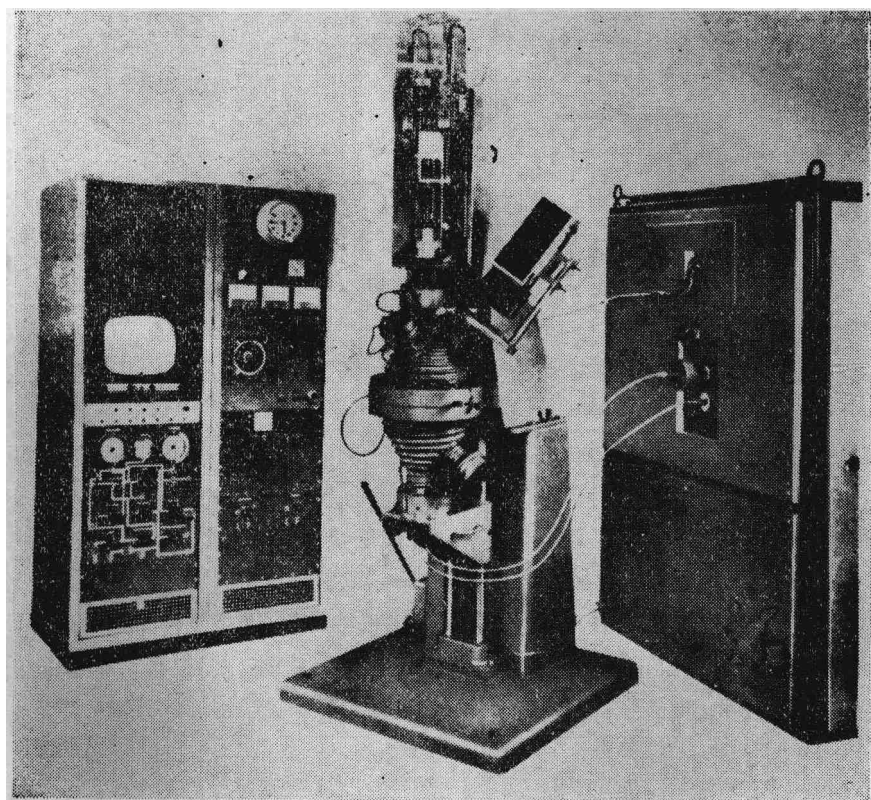
马尔温型(Malvern)单晶炉是恰克拉斯基法晶体生长设备,如照片1。该设备可生长各种单晶,包括GaP、GaAs、白宝石、红宝石、钽铝、石榴石、钨酸钙、铈酸锂、铈酸钡钠、钒酸石榴石<G.G.G.>及稀土金属单晶。

该设备包括有主架及生长室支架;籽晶杆坩埚杆转动和升降机构;各种生长室;高频发生器;电气控制柜等。

各种生长室可互换,安装在主架上的手动水压机可调整生长室支架的位置。

籽晶杆升降机构和坩埚杆升降机构还附有压力补偿机构。

单晶直径自动控制单元装在提拉杆的最上端,它应用闭环电子线路引出正比于单晶重量的直流输出信号,它的电子控制系统还有振荡器、解调器、前置放大和温度补偿器。



照 片 1

电气控制柜包括全部控制仪器和监视仪器，工业电视监视，高气压和低气压的控制等；单晶生长控制参量用四位数码指示并可记录。

此外还有真空系统（机械泵、扩散泵及检测设备），冷却水系统等。

（二）主要技术指标：

工作压力	0 ~ 100 大气压，0 ~ 200 大气压。
高真空极限	10^{-5} 毫 ~ 2 大气压，
高频发生器功率	30KW
晶体最大重量	1.7kg < 指 GaP >
晶体直径	15 ~ 50mm $\pm$ 2 % < 指 GaP >
晶体密度适用范围	2 ~ 22g/cm ³
晶体提拉杆升降最大行程	225mm
坩埚升降最大行程	100mm
坩埚转速	1 ~ 65 转/分
晶体提拉杆转速	1 ~ 160 转/分
坩埚升降速	0.04 ~ 39.6mm/时 变换传动机构后最慢可达 3mm/天
晶体提拉杆升降速	0.3 ~ 305mm/时，无爬行，精度达 3 %
晶体提拉杆偏心率	< 0.025mm
晶体生长室尺寸	

石英生长室	高压生长室	真空生长室
1 内径50mm, 容积0.85升	C/3000型内径100mm	内径350mm
2 内径75mm	C/1500型	接机械泵、扩散泵的出口尺寸是内径
3 内径100mm容积3.4升	内径240mm	200和100mm两种

(三) 马尔温 (Malvern) 型提拉单晶炉特点:

1. 晶体称重法自动控制晶体生长:

自动控制晶体生长方法, 除了晶体称重法外, 还有很多方法, 但都还存在一些问题。见表 1

表 1

自动控制晶体生长方法	存 在 问 题
1. 光学高温计探测热辐射圈	不适用于高压气氛晶体的生长, 目前多用于硅晶体生长
2. 电视投影成像	光学成像, 电子线路均较复杂
3. 珀耳帖 (Pel-tier) 冷却效应	目前还处于科研阶段
4. 熔体称重法	浮置难解决称重机械复杂

而晶体称重法却广泛用于各种晶体生长, 如果把晶体称重法与溶体称重法比较一下, 就会发现有如下优点:

- a) 易于操作,
- b) 体积小,
- c) 荷重元件与晶体生长位置相隔较远, 因此可以更好隔热和防止高频干扰,
- d) 消除了坩埚及熔体的浮置问题, 在高压气氛和真空系统都可采用, 也可用于低压和常压操作。

下面介绍晶体称重法控制晶体直径:

(1) 晶体称重法自动控制晶体直径的原理:

理:

荷重元件所受到的向下的力不仅有晶体重量, 还有表面张力和弯月体所附加的力。

总的受力可以看成:

$$\begin{aligned}
 F(t) = m_0 g + \int_0^t \rho_s g \pi r^2 v dt \\
 + \pi r^2 \rho_L g h \text{ (弯月面的液重)} \\
 + 2\pi r \sigma_{LG} \cos \theta_L \text{ (表面张力分量)}
 \end{aligned}$$

$m_0 g$: $t=0$ 时的静态晶体重量,

h 弯月体的高度,

θ_L 弯月体在与晶体接触处与垂线所成的角度

σ_{LG} 熔体的表面张力

如果考虑等径生长晶体时, 那么式中的最后两项是与时间无关的, 在时间 t 内晶体重量

力为:

$$F_0(t) - F(0) = \int_0^t \rho_s g \pi r^2 v dt$$

当晶体等径生长时，荷重元件的外端输出是一个线性增长的等变电压。因此若从称重头所得到的重量信号中减去一个合适的等变电压，就有可能对直径的积累误差进行测量和控制，这个合适的等变电压，即参考设定信号是将一线性电位计与拉杆提升机构机械地耦合来得到的。也可以将信号进行微分，从参考设定微分信号中减去称重头输出的微分信号来控制直径。晶体肩部和尾部的生长是通过一个非线性电路产生的参考信号来控制的。

(2) 称重头

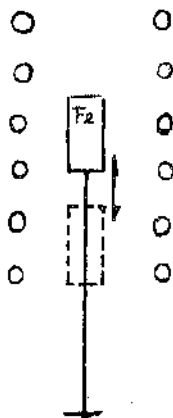


图 2—1 线性可变差动变压器示意图

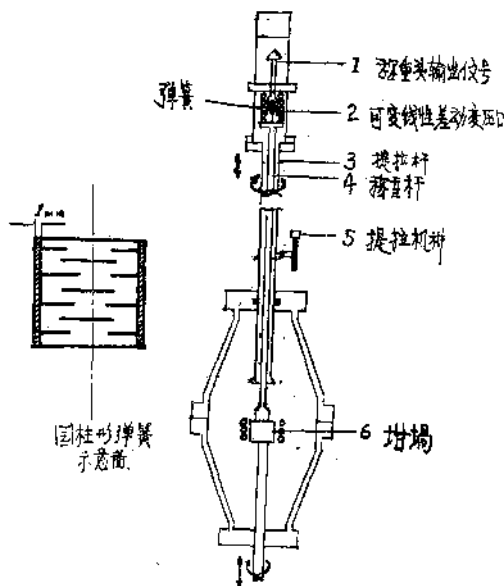


图 2—2 称重头在单晶炉中部位示意图

在介绍称重头之前，先介绍一下线性可变差动变压器（L. V. D. T），如图 2—1 所示，当铁心在带电的铜线圈内上下移动时，由于电感发生变化，在输出信号中也将有相应的电位变化。当铁心的位移和晶体重量成线性关系时，输出的电位就具有线性变化。

显然线性可变差动变压器还有外围电路，包括振荡器、检波器、前置放大器以及温度补偿系统等。将线性可变差动变压器的铁心与一个准确标定过的圆柱形弹簧机械地耦合，并将拉杆挂在弹簧上，就组成了一个称重头，如图 2—2 所示。这就可使称重头的输出信号与晶体重量成一定线性（等径时）或非线性（引径扩肩）的关系。

用滑环装置进行电接触，使拉杆能够转动，同时还可将称重头的输出信号取出。

称重头见照片 2。

称重头感量约 1.0mg，最大称重量为 1700 克。

(3) 线性电位计：是产生参考设定信号的，结构示意图如图 2—3 所示，它是将一个精密的线性电位计安装在拉晶炉的框架上，用拉晶杆提升机构直接驱动，得到一个直接与拉杆位置成比例的电位，将这个位置电位进行一定的处理，就可与称重头输出信号进行比较了。

(4) 晶体直径的自动控制：

用晶体称重法实现晶体直径的自动控制有两种方法：

① 总重量法：

等径时, 晶体总重随时间是线性变化的, 故称重头输出的信号也是线性变化, 如图 2—

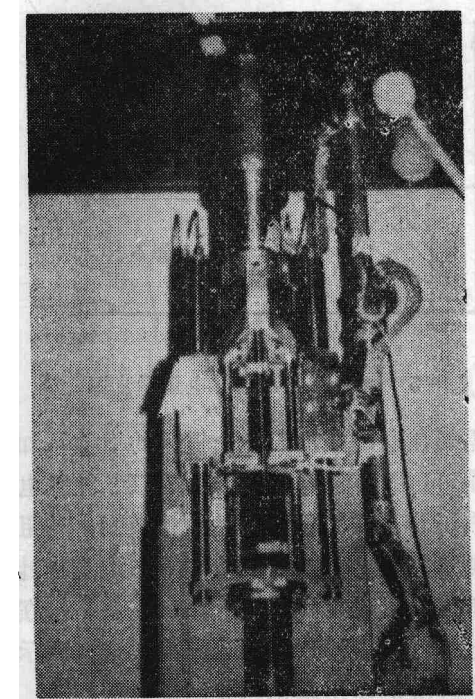
4 所示, 当称重头输出信号与参数设定电位发生了偏离, 就表示单晶等直径生长发生变化, 这个差值经电子线路放大后, 输入到功率调节, 使直径的偏离恢复到原直径生长, 从而达到控径的目的。

晶体直径大小的设定是由斜率决定的, 当晶体材料密度不同时, 也影响斜率的大小, 一般要求的晶体直径越粗、密度越大, 设定的斜率也就越大, 这在控制盘上有专门旋钮调节。

放肩时, 称重头输出的信号是非线性的, 接近平方规律, 故参考设定电位也应是非线性的, 这在电路中串一非线性元件即可实现。控制盘上专有一个“肩长”旋钮来调节。

②微分法

晶体直径的自动控制, 还可用微分法, 即把质量随时间的变化率 (dm/dt) 作为控制信号。因为称重头输出的信号, 可以通过电子线路进行微分处理, 变成微分信号, 这个微分信号再与参考设定的微分信号比较 (如图 2—5 所示), 也可达到直径自动控制目的。



照片 2 称重头

信号进行微分处理后, 晶体等径生长时, 信号就是一个水平直线, 参考设定信号也应是水平直线, 直线的设定位置越高, 即设定电压幅度越大, 晶体的直径将越粗。放肩时重量信号微分处理后, 其斜率将决定于放肩尺寸, 设定的放肩微分信号, 也应是一条直线, 设定的直线斜率越大, 肩将放的越短。

dm/dt 表示质量生长率, 在等径生长时, 它已是与时间无关的量, 可以认为在晶体生长的任一瞬间, 它表示一个极薄晶体小薄片的重量 (如图 2—6 所示), 由于薄片可以看成无限薄, 所以就可认为 dm/dt 电信号只是与直径有关的量。这个微分量与设定的电位微分值比较, 就能控制直径等径生长。

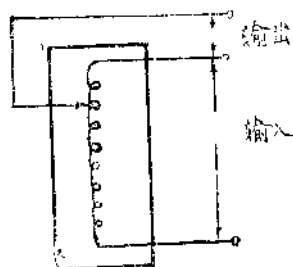


图 2—3 线性电位计示意图

从理论上讲, 对任何晶体都可以用微分方法进行控制, 但在实际操作时, 对于慢生长的晶体, 如红宝石、白宝石、YAG、GGG, 由于晶体生长很慢, 信号微分后很微弱, 甚至比干扰信号还小, 容易造成失控, 故一般微分法用于快生长和晶体密度较大的晶体, 如 Si 等。慢生长的晶体采用总重法。

(5) 进相器:

在晶体直径自动控制过程中, 除了考虑重量因素外, 还应考虑热惰性等因素对控径的影响。

如图 2—7 所示, 对于两种质量不同的熔体 M_1 和 M_2 , 当 $M_1 \gg M_2$, 那么功率的变化引起温度的变化, 直到温度达到平衡时所需的时间就不同, 显然 $t_1 \gg t_2$ 。这表示对大熔体调功

图 2—8 所示, 这就是电路中的进相器。

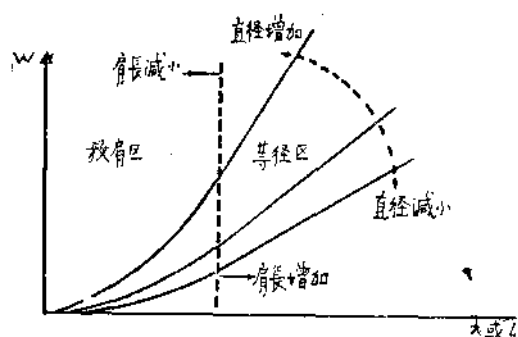


图 2—4 总重法参考电压示意图

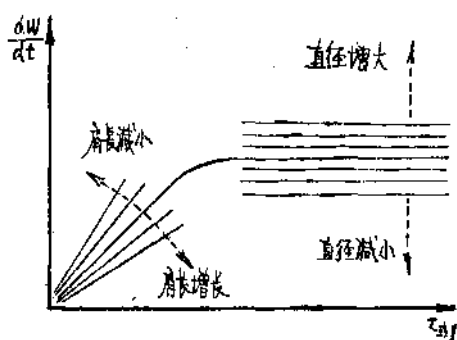


图 2—5 微分法参考信号电压示意图

率时, 温度的响应是很慢的, 为了克服这种热惰性, 需要在电路中加入一个提前的增益, 如图 2—8 所示, 这就是电路中的进相器。进相器的作用, 可用电压表针的摆动来说明, 测量电压当表针的阻尼合适时, 表针将不快不慢地到达测量范围, 若阻尼太小, 表针将很快到达测量刻度, 并跃过测量刻度, 造成指针在测量刻度左右摆动, 这就表示阻尼时间常数太小, 而使指针摆动太快, 反之, 若阻尼太大指针将很慢到达测量刻度, 这又表示阻尼的时间常数太大了。这种阻尼作用就相当我们说的进相器。

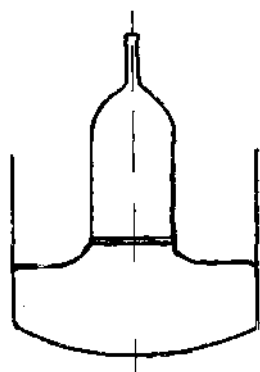


图 2—6

图 2—9 所示, 当增益的时间常数很小时, 晶体将出现葫芦状, 当增益的时间常数很大时, 晶体的肩将放得很长, 只有合适的时间常数, 才会有完好的晶体外形。这个增益的时间常数一般由实验来确定。

在控制盘上, 也有相应的进相器旋钮进行调节。

(6) 热场温度梯度对控径的影响:

当温度梯度小时, 温度改变引起的直径变化就会较大, 当温度梯变大时, 温度改变引起

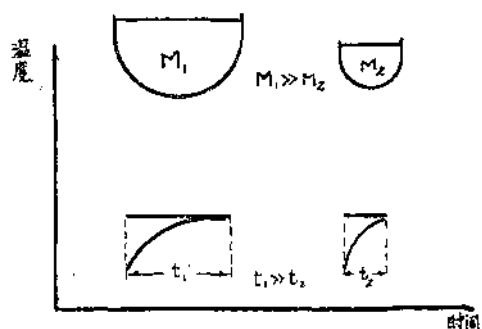


图 2—7

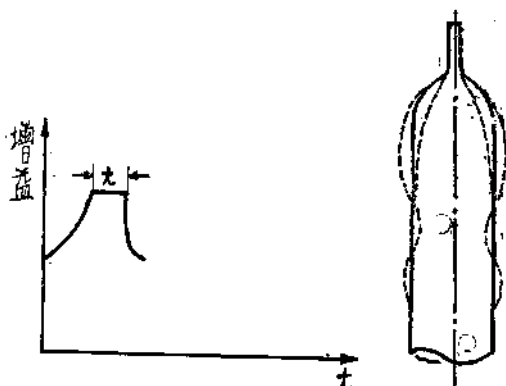


图 2—8

图 2—9

的直径变化就会较小, 为了保持完好的晶体外形, 并使自动控制容易, 除了需要温度梯度大些

以外，也还需在电路中有相应的增益改变，来阻尼等径时直径变化的调节。这在控制盘上也有相应的增益旋钮。

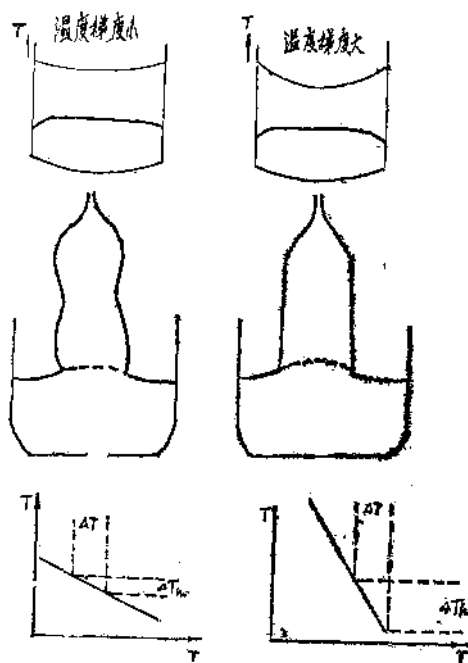


图 2-10

(7) 晶体生长自动控制线路方块图

虚线右边是晶体称重信号与设定信号比较，并加入相进信号，再放大，以控制功率达到自动控制晶体直径生长。

虚线的左边部分是功率控制和功率稳定系统。

(8) GaP 晶体生长自动控制：

由于GaP晶体是在高压下用液体复盖法拉制，在晶体生长的自动控制过程中，除了考虑重量、温度梯度、热惰性等因素之外，还要考虑复盖液 B_2O_3 的浮力对直径的影响，由于晶体必须通过液态 B_2O_3 ，而使 B_2O_3 对晶体产生浮力。在拉制过程中， B_2O_3 厚度 h 在改变（见图2-12），浮力也就在改变，特别在放肩和直径变化时，浮力变化是较大的，这时称重头的重量已不是晶体的真正重量而是被浮力抵消后的重量。另外， B_2O_3 透明度变坏将导致热辐射减小，造成熔体温度上升，表面张力减

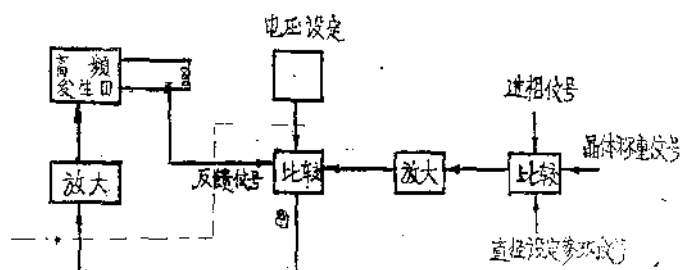


图 2-11

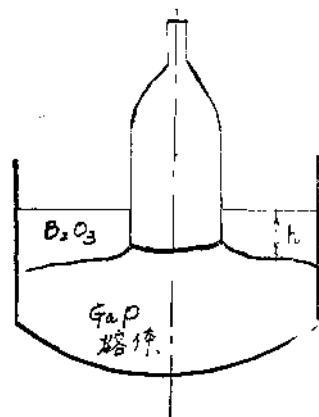


图 2-12

少，也导致使晶体直径改变。GaP晶体生长中这些变化量，前述的闭环控制将有困难，需要再加入校正项，这属于MR公司的专利。

2. 高压生长室介绍

(1) 高压生长室结构示意图2-13所示。

炉膛壁厚约18mm热压而成，热压后经抛光，炉膛内径有两种，C3000型 10cm

C1500型 24cm

炉膛高60cm (C1500型)

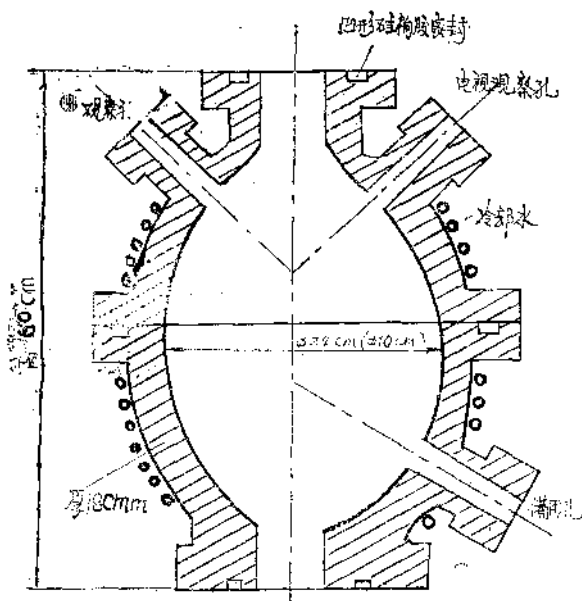


图 2—13 高压室示意图

18mm, 厚10—12mm与不锈钢热压封接。

与窗孔白宝石连接的还有一个石英棒放在不锈钢筒内, 伸入炉内, 石英棒头部呈凹形,

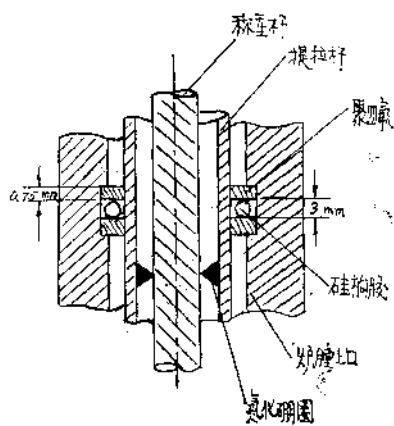


图 2—14

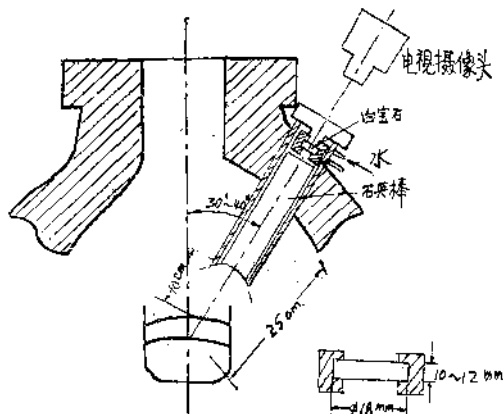


图 2—15

使视野增大。放石英棒的目的是使石英棒头部的温度在1000℃左右, 这样挥发物不易沉积, 保证观察孔透明度总是很清晰。

(2) 压力补偿系统:

由于炉内是高压, 在拉杆和坩埚杆头部均受很大压力, 这使驱动的马达负荷超重, 故必须有拉杆和坩埚杆的压力补偿系统。压力补偿原理很简单, 就是将炉内的高压引出炉膛外, 与炉膛上方拉杆和下方坩埚杆连接, 使压力互相抵消, 图 2—16示意了拉杆的压力互补结构。

提拉杆与炉膛的密封如图 2—14所示。

称重杆是在拉杆内, 这样称重杆就不与炉膛接触。炉膛内的高压气体可以通过拉杆与称重杆的缝隙进入称重头。为了防止称重杆在拉杆内摆动, 在拉杆内有一圈氮化硼定位环, 这就可使称重杆的轴向偏离不超过20μ。

拉杆与炉膛的高压密封是靠聚四氟乙烯和硅橡胶, 这种高压密封环一般用15~20次就需更换。

其它处的高压密封均采用凹形密封圈。

观察孔结构见图 2—15。在实际操作中, 为了安全起见, 操作人员在另一房间, 用电视摄像头通过观察孔观察炉内情况。白宝石作透明体, 白宝石直径

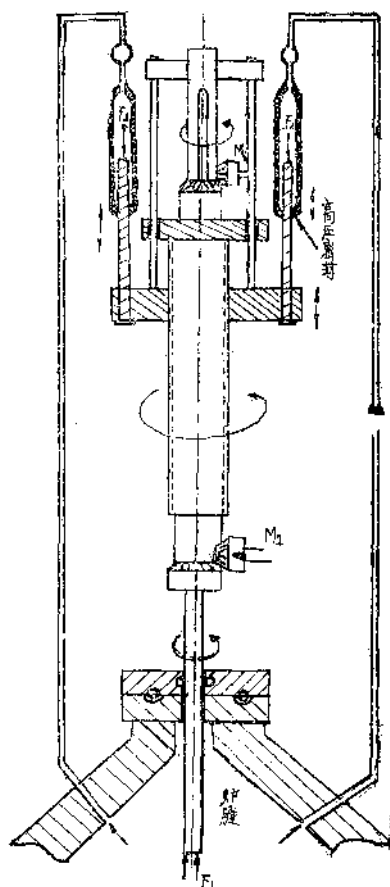


图 2—16

M_1 马达使拉杆转动,

M_2 马达使拉杆升降,

拉杆受的壓力 F_1 与引出的壓力 F_2 互相抵消, 这对拉杆升降就不受炉内压力的影响了。

马达 M_1 、 M_2 220V 1/4A 50W, 马达与转动升降机构都是软连接。

(3) 高压炉膛上有安全帽, 压力超过限定值, 就会自动放气。一般高纯瓶装 N_2 气不需再净化。

拉晶完后, 炉膛壁会有 1—2 mm 厚的沉积物, 需要清洗, 清洗时要有抽风罩, 随时将灰尘吸去。

称重头一般不易受沉积物污染, 使用很长时间也不必清洗。

三、磷化镓晶体生长

近年来, 磷化镓晶体可以应用恰克拉斯基法生长较大的、掺杂的单晶。

(一) 磷化镓的合成

合成磷化镓用汽相磷在高温下与 Ga 反应直接合成, 反应是在密封石英容器中进行, 红磷纯度 99.9999%, 镓在石墨感应体中用高频加热到 1500°C , 同时用电阻炉把红磷加热使之蒸发, 磷扩散入 Ga 中形成熔液状 GaP, 使之定向结晶形成 GaP 多晶棒。

石英反应容器 (图 3—1) 是放置在一个金属的高压容器之中, 外壁用水冷却, 金属容器内充 15 大气压氮气, 使石英反应器壁的压差减少。

据认为用此方法直接生长 GaP 单晶是有困难的, 都是多晶, 切片以后可见是透明的橙色多晶片。

(二) 磷化镓单晶的生长

磷化镓单晶是应用高压熔液复盖恰克拉斯基法生长 (LEC 法), 即在高

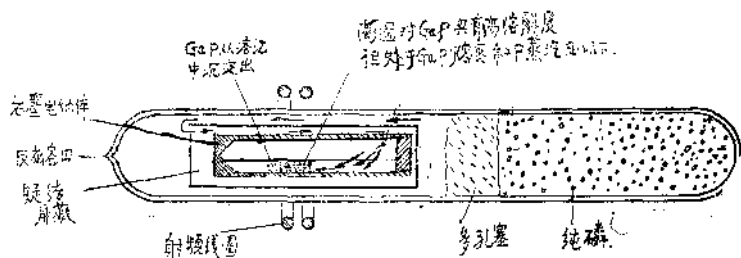


图 3—1 磷化镓合成

压密封容器中充 70 大气压的氮气, 并加热熔化。磷化镓熔体上复盖一层厚度为 15—20 mm 的 B_2O_3 ; B_2O_3 的熔体是光学透明的, 并且不会同熔融的磷化镓发生化学反应。 B_2O_3 起着活动包封的作用, 以防止磷化镓的分解, 拉晶是穿过 B_2O_3 熔液进行的, 操作时, 操作人员通过电视远距离观察, 以保证安全。调节输出功率或晶体的拉速来控制直径。拉速随功率或功率随拉速而变化的, 以保持液面位置不变。但由于 B_2O_3 的透明度是随时间而变化的, 观察不到晶体生长情况, 所以拉晶时间一般 1—4 小时, B_2O_3 透明度降低, 观察不到晶体生长情况, 所以拉晶时间一般 1—4 小时。

动控制系统，保持晶体的等径生长。这样也可保证晶体拉速均匀，使掺杂均匀，减少缺陷和热应力。等径控制是用晶体称重法达到的。飞利浦公司曾报导过用X射线透射用电视系统进行控制。

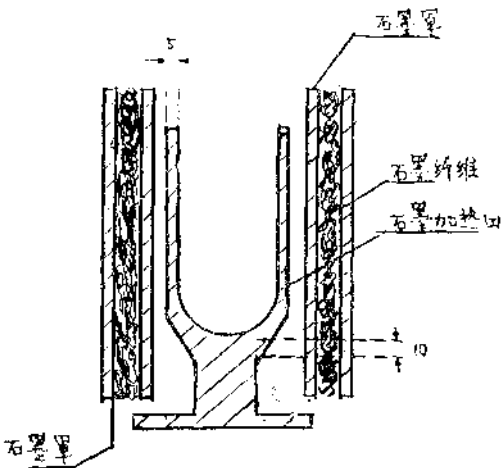


图 3-2

石墨加热器外有两层石墨罩，中间放石墨纤维保温（图 3-2），上部不加盖，加盖后不好生长。同样，加后热器晶体也不易生长。改变加热器厚度及底部形状可调节温度梯度。

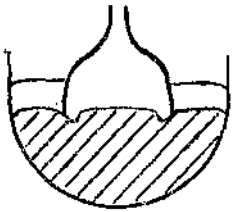


图 3-3

加热方式有高频和电阻加热两种。高频加热是以石墨作感应体，电阻加热是用石墨作加热器。早期感应加热可拉 500g GaP 单晶。用电阻加热设备，加大腔体，可拉制 2kg GaP 单晶，也可能拉 5kg GaP 单晶。坩埚用石英较 BN 好，因为 BN 坩埚纯度低，且价格高（石英坩埚约 20 英镑，BN 坩埚约 100 英镑）。

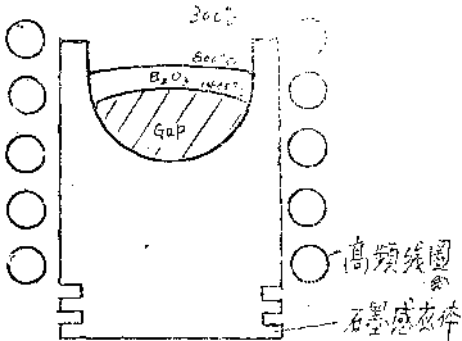


图 3-4

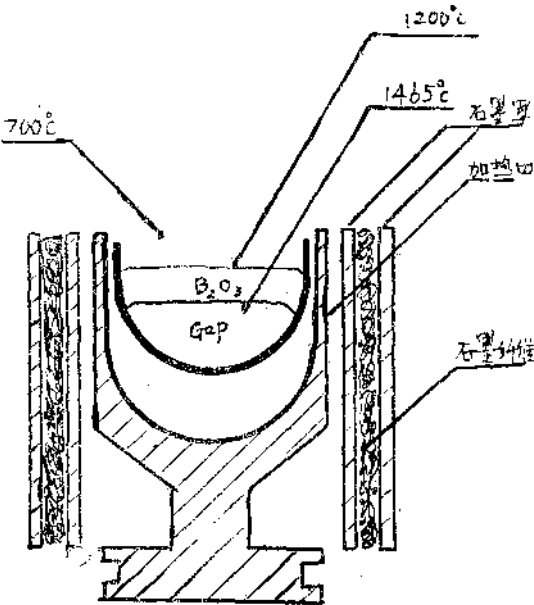


图 3-5

GaP 晶体固液界面从理论上也是微凸为好，便于排除孪生物，但由于 GaP 在高压的气象下生长，热传导较好，晶体冷却较快，实际固液界面如图 3-3 所示，即 W 型为好。生长时一般为整个单晶，但有时发生特殊情况，如沉积物等落入，会使一部分表面成多晶（约 5mm

厚), 中心仍然为单晶, 坩埚直径与晶体直径之比以2:1为好。

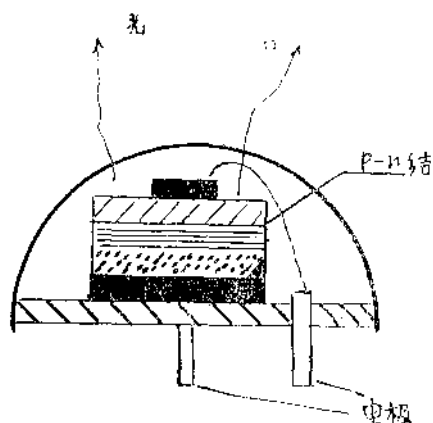


图 3—6

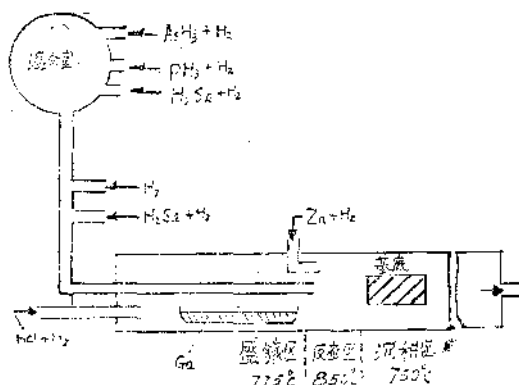


图 3—7 汽相外延工艺

(三) 晶体质量

1. 最初用高频加热方式, 晶体的位错密度为 $10^6-10^7/\text{cm}^2$, 这是由于 B_2O_3 温度梯度较大(图 3—4)。当拉晶时, B_2O_3 表面温度 800°C , 晶体拉出 B_2O_3 后温度为 300°C 。现发展用电阻加热炉, 拉晶时 B_2O_3 表面温度 1200°C , 晶体拉出 B_2O_3 后温度为 700°C (图 3—5)。电阻法拉出的GaP晶体, 中心位错密度约为 $10^3/\text{cm}^2$, 表面2mm厚一层的位错密度约 $10^6/\text{cm}^2$ 。据说飞利浦公司可以做到无位错。

2. 化学配比度在整个晶体的80%范围内用质谱仪及化学分析方法未检查出有偏离。

3. 掺杂, n型GaP单晶是掺 Ga_2S_3 , 使S掺入晶体, 在一根长度为12cm晶体锭的顶部约为 $10^{17}/\text{cm}^3$, 尾部约为 $10^{18}/\text{cm}^3$ 。横向的不均匀性基本上检查不出来。掺 N_2 的GaP是加入GaN, 氮量的分析是用质谱法, GaP晶体中实际掺氮的浓度约为10ppm, 而质谱仪分析氮的灵敏度可达0.5ppm。

(四) 磷化镓单晶的应用

1. 概述

磷化镓单晶经过切片、外延等工艺可以制成固体发光器件, 它的寿命长, 是半永久性的。近几年这种器件发展很快, 广泛用于仪器、计算机和电子手表等, 作数字显示或作指示灯, 它可以发出红光或绿光等(发光波长随掺杂而变)。

早期用砷化镓制成的发光器件一个字如果发光20毫流明, 需要100毫安的电流。而现在用磷化镓制成同样一个发光器件, 发光20毫流明只需要10毫安电流。

目前用两层外延法制成的磷化镓发光管的效率商品水平为4—5%。温格洛夫认为影响磷化镓发光器件效率的主要因素是晶体中的位错密度, 位错密度高则发光效率低。

2. 磷化镓发光器件的结构和工艺

(1) 晶体加工

将尺寸、电性能和晶体结构都合要求的晶体, 切成厚250—300微米的晶片, 然后将一个面进行化学抛光, 在这些晶片上沉积一个或两个磷化镓外延层。

(2) 外延工艺和二极管结构

图 3—6 是用双汽相外延法制出的发光二极管的剖面图, 提拉法生长出的晶体基片上首

先沉积一层N型磷化镓（用砷或硫掺杂），并在二次沉积过程中改换掺杂剂来形成P型层，各层的厚度约为20—30微米。场致发光就是在p-n结上发生的。使用低压直流电源给p-n结施加“正向”电压就会产生这种发光效应。也可以制造仅有一个外延层的场致发光结，这个结是利用锌（P型）扩散入n型而形成的。

目前所用的外延沉积方法有两种，即汽相沉积法和液相沉积法，这两种工艺过程表示于图3—7及图3—8。

（3）汽相外延工艺

基本化学剂主要是气态的，因而对掺杂浓度的控制非常灵活，5种反应气体连同氢载气和所需的掺杂剂从反应器顶部送入，此外还引入HCl蒸汽，并使之流过盛镓的容器以便产生氯化氢蒸汽。通过反应区上述化学剂在基底处化合，结果就形成了具有所需特性的外延层。

（4）液相外延工艺

在这里，外延层是从熔融镓，磷化镓（多晶体）和所需的掺杂中生长起来，最通用的办法是“倾斜法”。需要熔化的材料放在石墨容器的一端，而抛光的基底则放在另一端。将容器在纯氢气氛中加热至1060℃。此加热器的中心是装在绞链上，当温度合适时就把容器倾斜，使熔融材料复盖到基片上。在容器缓慢冷却期间，具有一定杂质溶液的磷化镓就在基底上沉积而形成外延层。把磷化镓外延层再经过切割成二极管，检查和连接好引线，以及封装好，便成磷化镓发光管了。

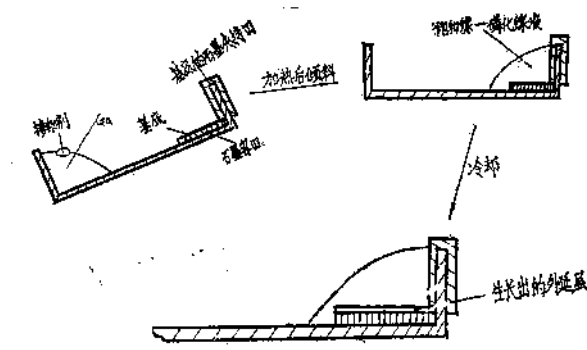


图 3—8 简单的外延工艺

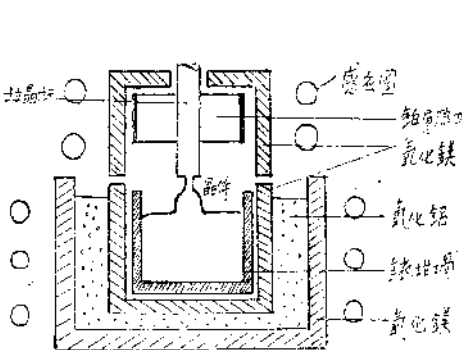


图 4—1

四、其他晶体的生长

白宝石（ Al_2O_3 ）生长较困难，因为温度高，必须用铱坩埚。炉内装置如图4—1所示。

在熔体上面加一铂筒后热器，其目的在于减少系统的纵向温度梯度，使熔体上部的温度梯度降到30~40℃/cm。这样一来，生长出来的晶体就不会炸裂。加了铂后热器后，后热器内温度可达1000~1500℃，而在不加后热器时只有500℃。

白宝石生长速度为5~8 mm/hr。在有掺杂的情况下，如 $Al_2O_3:Cr$ 的情况下，其拉速为1~2 mm/hr，最大为2.5 mm/hr。生长气氛为 $Ar + 5\% O_2$ ，有少量氧气的目的，是防止晶体由于缺氧而引起着色。

在 $Ar + 5\% O_2$ 气氛中，即使是高温，铱的氧化仍然是很慢的，一个铱坩埚可用15—20次。

由于白宝石熔点很高，所以加热速度不能太快，以免由于熔体过热，使坩埚熔坏。另外，熔体过热还可能 Al_2O_3 籽晶夹头熔坏。

为了避免晶体出现包裹物，提高晶体质量，一般可采取以下途径：

- (1) 减小晶体直径；
- (2) 降低生长速度；
- (3) 采用等径生长工艺，用坩埚随动来补偿液面下降。

用上述装置也可以用来生长钨酸钙、钆镓石榴石（GGG）等晶体。该公司用此单晶炉生长的这些单晶尺寸为 $\phi 35\text{mm}$ ，长 150mm 。德国和瑞士的一些公司已能长出 $\phi 80\sim 90\text{mm}$ ，长 300mm ，重 $3\sim 4$ 公斤的GGG大单晶。

光波長與波數的關係，即波數與波長成反比。波數的單位是每厘米的波數，波長的單位是厘米。波數與波長的關係式為：

$$\lambda = \frac{1}{\sigma}$$
 其中 λ 為波長， σ 為波數。

波數與波長的關係式為：

$$\lambda = \frac{1}{\sigma}$$
 其中 λ 為波長， σ 為波數。

波數與波長的關係式為：

$$\lambda = \frac{1}{\sigma}$$
 其中 λ 為波長， σ 為波數。

波數與波長的關係式為：

$$\lambda = \frac{1}{\sigma}$$
 其中 λ 為波長， σ 為波數。

波數與波長的關係式為：

$$\lambda = \frac{1}{\sigma}$$
 其中 λ 為波長， σ 為波數。

波數與波長的關係式為：

$$\lambda = \frac{1}{\sigma}$$
 其中 λ 為波長， σ 為波數。

波數與波長的關係式為：

$$\lambda = \frac{1}{\sigma}$$
 其中 λ 為波長， σ 為波數。

四、其他波長的求法

波數與波長的關係式為：

$$\lambda = \frac{1}{\sigma}$$
 其中 λ 為波長， σ 為波數。

波數與波長的關係式為：

$$\lambda = \frac{1}{\sigma}$$
 其中 λ 為波長， σ 為波數。