

石英晶体膜厚控制仪

XDM、MXC

Crystal Thin Film Deposition Controller

User manual

用
户
手
册

上海膜林科技有限公司

Shanghai MorningTech Co., Ltd

目录:

变更履历

第一章 仪器介绍与技术规格

- 1.1 仪器介绍
- 1.2 技术规格
- 1.3 MXC-3K 与 XDM-3K 异同点

第二章 硬件安装及配置

- 2.1 XDM2 前面板
- 2.2 XDM2 接口
- 2.3 XDM3 接口
- 2.4 振荡包 XDM-X 接口
- 2.5 仪器硬件总体
- 2.6 输入端口自定义配置
- 2.7 输出端口自定义配置
- 2.8 蒸发源坩埚配置
- 2.9 硬件配置举例一
- 2.10 硬件配置举例二

第三章 仪器使用

- 3.1 人机界面操作
- 3.2 系统使用介绍
- 3.3 新手上路

第四章 通信协议

参见串口通信协议篇，另附。

第五章 常见问题及对策

- 5.1 常见问题及对策
 - 5.1.1 新晶振片安装后损耗不正常
 - 5.1.2 晶振探头是否良好的快速检测方法
 - 5.1.3 晶振失效或频率不稳定

5.1.4 输入输出检查

5.1.5 坩埚不转动、不到位或到位与手动存在偏差

5.2 联系我们

第六章 一些说明

6.1 XDM 如何实现自动控制

6.2 基本原理

6.3 厚度计算方法及多层膜算法

6.4 阻力损耗

6.5 密度与声阻抗率

6.6 比例系数

6.7 PID 速率控制

6.8 晶控厚度控制

6.9 控制延迟

6.10 最大功率延迟

6.11 如何指定运行膜系

6.12 如何只用于监测速率和厚度

6.13 可选功能

6.14 为什么有时镀膜机打到自动时，坩埚会自己跑到 1 号位

附录 A 上位机 Windows API 串口编程举例

附录 B 常见材料 Z-ratio, Density 表

变更履历

版本	发行日期	变更略要	作成者	审核	备注
Ver2. 0. 0	2012. 07. 26	初版	张子业		非公开版
Ver2. 0. 1	2013. 04. 30	新增 XDM3	张子业		用户版
Ver2. 0. 2	2013. 06. 17	新功能释义	张子业		用户版
Ver2. 0. 3	2013. 08. 05	新增试用期	张子业		用户版
Ver2. 1. 0	2014. 10. 10	新增 MXC	张子业		用户版
Ver2. 1. 1	2014. 10. 30	修订 5, 6 章	张子业		用户版

版权声明：

本手册版权属于上海膜林科技有限公司所有， 对外仅供 XDM 用户及经销商使用参考。在未得到本公司授权的情况下，不得复制、传播。

第一章 仪器介绍与技术规格

本章对 XDM 晶控仪的总体进行介绍，可帮助第一次接触本机的用户对 XDM 整机有个大致了解。

1.1 仪器介绍:

XDM、MXC 晶控仪属于同一系列，XDM-3K 与 MXC-3K 尺寸一样，且后面板硬件接口完全兼容。本手册不单独列出 MXC。对于二者不同处，请参见本章第 2 节。

本仪器是新一代石英晶体膜厚控制仪，适用于光学薄膜真空镀制过程的膜厚控制与速率控制，也可用于其他需要实时监测石英晶体频率变化的场合。

它包含了传统膜厚控制仪的基本功能，如坩埚位置、蒸发源功率、膜厚控制、速率控制、多层膜自动切换等；更提供了晶振片的阻力损耗状态分析功能；融合了新的算法，实时计算多层膜的精确理论厚度。肯定有您需要的实用功能。

- 真彩色触摸屏，中、英文即时切换^[1]，并附有在线帮助。操作极易上手
- 速率控制准确快速稳定，PID 参数容易整定
- 控制延迟及最大功率延迟功能，有利于既快速又稳定地建立成膜初始速率，有效防止初始速率过冲。
- 灵活的、兼容性广的、容易理解的硬件接口及配置，方便新镀膜机安装及旧机升级、改造
- 硬件参数界面配置，容易实现多层膜自动成膜，并提供用户密码保护硬件配置
- 常规气动挡板以外，可设定为电机式挡板控制，方便一个挡板交替遮挡多个位置蒸发源
- 坩埚定位快速准确，并有到位延迟功能，有效解决某些点坩埚自动与手动状态下位置不重合现象
- 成膜层数据自动记录，方便回看成膜历史数据
- 成膜过程中断电数据保持，恢复上电后，可一键继续完成成膜。
- 专利的频率测量模块与外围控制模块分立，有利于精准的频率测量与快速的外部响应
- 专利的晶振片阻力损耗测定，用于连接线状态、晶振片安装状态、速率不稳、晶振失效原因分析等。阻力损耗值按区间分颜色显示，直观明了

- 可设定的使用晶振片原始速率控制，调节比例系数不再影响真实速率!
- 可设定的多层声学精确厚度计算法，突破单层算法原理上的精度限制
- 可选配的专利的厚度补偿功能，大幅提高膜厚准确度，特别是超薄层^[2]
- 可选配的频率-厚度计算工具^[2]
- 上述所有优点都依赖于内核精准、稳定的频率测量

注: [1]. 有其它语言要求的，可商谈

[2]. 选配项需额外付费

1.2 技术规格:

1.2.1, 测量:

1 路 sensor
晶振片频率, 6MHz, 可用至 5MHz
频率分辨率, 0.005Hz
膜厚与沉积速率显示分辨率, 0.1A, 0.1A/S
膜厚准确率, 0.5%
取样周期, 100ms

1.2.2, 蒸发源

蒸发源数: 3 路
电压控制: 0~10V
分辨率: 16bits
更新周期: 100ms
硬件接口: BNC 座

1.2.3, 输入/输出

输入: 8 路 LVTTL, 兼容 TTL 电平
输出: 10 路单刀单掷常开(SPST-NO) 继电器, 额定 2A , 30V(DC)/250V(AC).
扫描/更新周期: 100ms
所有输入输出端口可配置, 系统默认值可兼容其他机型。

1.2.4, 计算机通信

1 路 RS232C, 速率 9600、115200 可选择

1.2.5, 工作条件

电源输入: 100V /220V AC, 50~60Hz, 最大功率 30 VA
保险丝: 0.5A, $\Phi 5 \times 20$ mm
工作温度: 0~50 摄氏度

1.2.6, 其它

XDM2
主机外形尺寸: 300mm×203mm×88mm (前后长×正面宽×正面高)
重量: 约 2.5Kg
在两侧距离前面板 18mm 处留有两个 M3 固定孔。

XDM3 一个标准机柜宽度, 88mm(2U) 高. 300mm 深

1.3 MXC-3K 与 XDM-3K 异同点

型号	MXC-3K	XDM-3K
晶振片	6MHz	
频率分辨率	0.005Hz	
频率稳定度	1ppm	
探头接口	1	
IO 口	8 输入, 10 输出	
源输出	3 个, 0~10V, 16bit	
触控屏	真彩色, 中文/英文	
材料数	96	
层数/膜系	48 层 可自动串接	112 层 可自动串接
膜系数	60	20
U 盘膜系	--	支持
多层算法	--	支持
厚度补偿	--	可选
六探头	--	支持

第二章，硬件安装及参数配置

本章介绍如何让 XDM 实现自动成膜控制，介绍的硬件连接及配置部分，解决的是 XDM 与周边硬件的互动。

本章介绍了 XDM 晶控仪的各硬件接口及其配置方法，并提供了详细的配置方法举例。适合于晶控仪硬件安装及调试人员。

XDM 晶控仪安装方便，配置灵活，可适应于常见各型号的镀膜机。对于有特殊要求的客户，可与本公司联系。

XDM 系列晶控仪，目前有 XDM2 与 XDM3 两种；二者基本功能是一样的，最大的区别在于外形尺寸及输入输出端口各引脚的定义不同。其中，XDM2 是半个标准机柜宽，而 XDM3 是一个标准机柜宽度，二者高度均为 2U(88mm)，深度均为 300mm。

2.1 XDM2 前面板

主机的前面板正中安装有一块 4.3 英寸 16bit 真彩触摸屏。
所有操作可通过触摸屏完成。

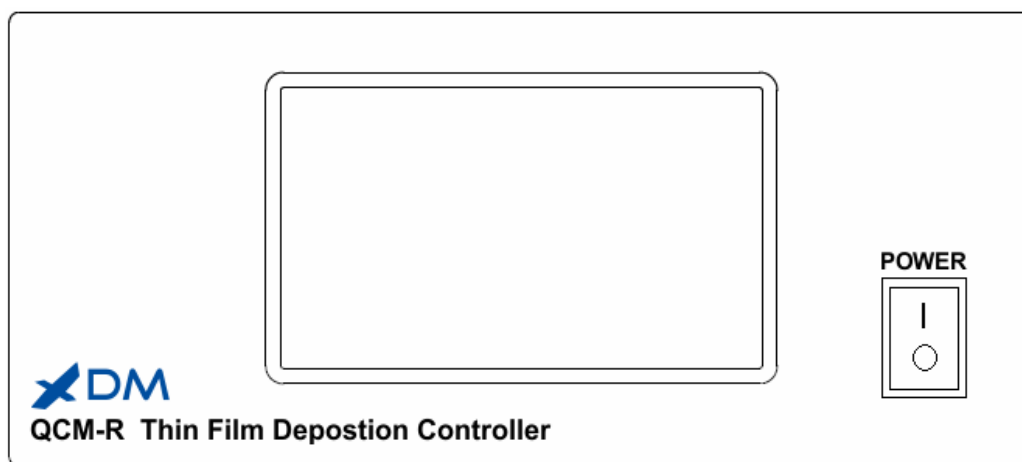


图 2.1 主机前面板

2.2 XDM2 接口

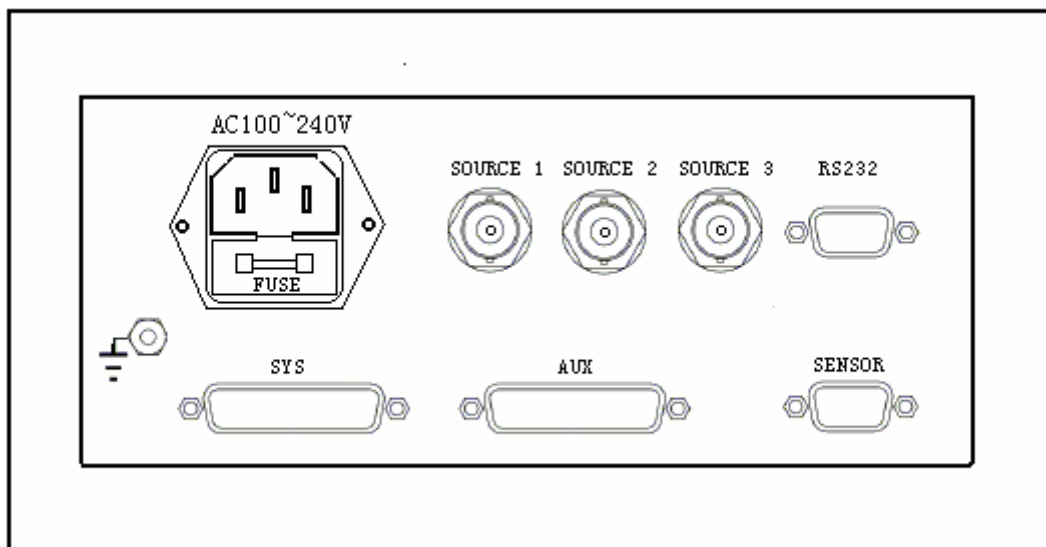


图 2.2 主机后面板

如图 2.2 所示，主机接口都位于后面板上。

电源接口下方安装有 0.5A $\Phi 5\text{mm} \times 20\text{mm}$ 保险丝；

蒸发源控制输出端口为上方 SOURCE1、SOURCE 2 和 SOURCE 3 三个 BNC 座；

“RS232” DB9 母座为标准串行口接口。

“SENSOR”为三排 DB15 母座，主机至 XDM-X 的连接电缆由仪器自带。

SYS 与 AUX 均为 DB25 公座，含输入输出接口。



图 2.3 DB25 公座

1) SYS I/O 引脚说明

表 2.1

继电器(输出)	引脚	默认功能	描述
1	1,2	源 1 挡板	
2	3,4	源 2 挡板	
3	5,6	水晶片切换	每次切换闭合 0.5 秒，断开保持 2 秒。
4	7,8	水晶片挡板	兼容某些镀膜机，实际没有此功能
5	9,10	Stop	Stop 状态输出
6	11,12		
输入	引脚	默认功能	描述
	13,14,15,	输入公共端(地)	用作输入公共参考地。输入端与参考地可

	16,17		构成回路*
1	18	Start 成膜	下降沿有效, 同命令 Start
2	19	Stop 成膜	下降沿有效, 同 stop 命令
3	20		
4	21		
5	22		
6	23	水晶失效禁止	参考地有效
7	24	清 0 厚度	下降沿有效, 同 Zero 命令。
8	25	保持阶段 2	参考地有效

2) AUX I/O 引脚说明

表 2.2

继电器(输出)	引脚	默认功能	描述
7	1,2		
8	3,4	源 3 挡板	
9	5,6	晶振失效	
10	7,8		

注 1: 引脚 13, 14, 15, 16, 17, 为输入公共端, 连接的是公共地。

注 2: 当输入端连通公共地时为低电平, 断开后为高电平。所以要产生一个有效的下降沿, 外部只需将输入引脚与公共地断开, 然后连通公共地; 如果二者连接一个常开的按钮开关的两引脚, 按下就是下降沿。为保证输入响应的有效性, 连通或断开的时间需要大于 200ms。

注 3: 继电器输出端点之间, 允许的电压为 30V(RMS), 最大电流 2A

注 4: 所有输入输出引脚功能都是可重新自定义的, 此处给出的默认功能是为了兼容某些机型。输入输出的序号与引脚之间的对应关系是固定的, 而功能是可重定义的。重定义后的信息要保存在仪器配置参数中。

3), SOURCE: 3 个源, 0~10V 电压输出。 16bit, 负载 400 欧姆。

4) RS232

通信接口为标准串口 RS232, 仪器自身接口为一个 9 针 “D” 型母座。

表 2.3

引脚	功能	描述
1	空	
2	TXD	XDM 数据发出端
3	RXD	XDM 数据接收端

4	空	
5	信号地	
6	空	
7	空	
8	空	
9	电缆屏蔽地	

上位机(电脑)可用常用串口连接线或 USB 转串口线，实现与 XDM 通信。

2.3 XDM3-接口

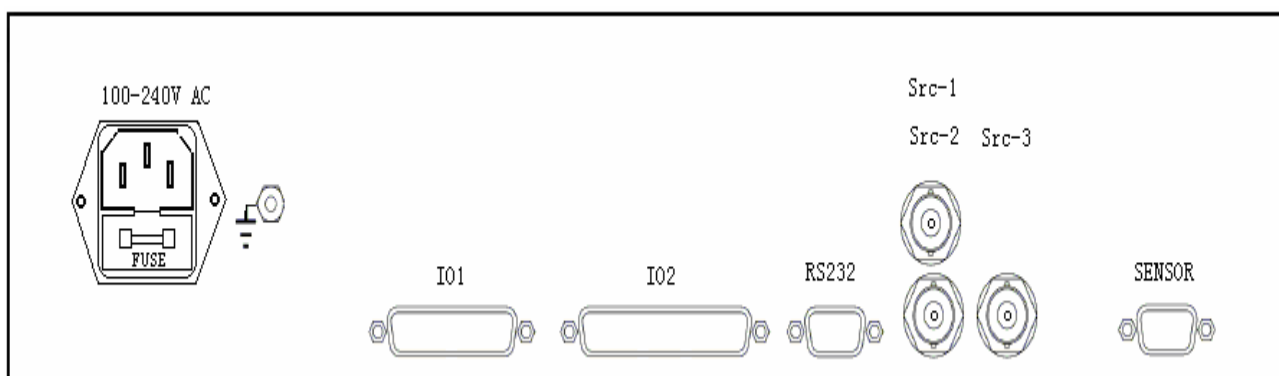


图 2.4 XDM3 后面板

XDM3 与前述的 XDM2 在输入输出接口上，功能是一样的，主要区别在于端口位置不一样。

XDM3 的输入输出接口，由接口名称为 I01 与 I02 的两个接口组成。I01 是一个 D 型 25 针公座，而 I02 是一个 D 型 37 针公座。

I01 包含输入功能号 1~8 的全部输入端，并包含继电器功能号 1~8 的输出端，管脚定义见表 2.4。

I02 包含所有的 8 个输入端口，并包含所有 10 个继电器输出端，管脚定义见表 2.4。

I02 包含所有的 I01 管脚功能，用户可根据需要任选一个端口使用。

表 2.4 XDM3 输入输出端口定义

功能	I01 管脚	I02 管脚
继电器 1	14,15	2,21
继电器 2	1,2	3,22
继电器 3	3,4	4,23
继电器 4	5,6	5,24
继电器 5	7,8	6,25
继电器 6	9,10	7,26
继电器 7	11,12	8,27
继电器 8	13,25	9,28
继电器 9		1,20
继电器 10		11,29
输入 1	16	30
输入 2	17	31
输入 3	18	32
输入 4	19	33
输入 5	20	34
输入 6	21	35
输入 7	22	36
输入 8	23	37
输入共地	24	12,13,14,15, 16,17,18,19

2.4 振荡包 XDM-X 接口

晶振片振荡驱动装置，俗称振荡包，系统称 XDM-X。

振荡包与 XDM 主机的接口为一个 DB9 公座，其中的连接电缆由仪器附带。

振荡包与用户探头机构(真空室外)的接口为一个 BNC 座。仪器附送一根 150mm 长双头 BNC 连接电缆供二者连接。

2.5 仪器硬件总体：

主机 1 台、

振荡包 XDM-X 一个、

8 芯屏蔽电缆一根(主机-振荡包)，约 4m~4.5m 长、

三芯电源线一根，1.5m~1.8m 长、

双头 BNC 连接电缆一根，约 150mm 长，用于连接振荡包与用户探头机构。

2.6 输入端口自定义配置

XDM 共有 8 个 TTL 兼容的输入端口，端口序号与硬件接口引脚是一一对应的，参见 第 2.3 节。



图 2.5, XDM 输入端口

以 XDM2 为例，如图 2.5，系统的每个输入端口内部都有上拉，若端口悬空时，内部为高。图 2.4 显示的是输入端口 1，它位于“SYS”接口 第 18 引脚。“SYS”接口的 第 13~17 引脚均为地电平。

若使用输入端口 1，从“SYS”第 18 脚引一根线，另外从第 13~17 中任意一脚引一根线。两根线连通，则输入为低电平，不连通则为高电平。

所有输入端口的功能及有效方式都可自由定义。分 45 种输入功能，每种功能都对应一种有效方式。设置界面中不用功能号，而是直接使用名称进行区别。

对于 XDM3，与 XDM2 的区别仅在于管脚位置不一样，功能及使用方法都是一样的。

表 2.4

功 能 号	名称	有效方式	备注
1	未分配	无	不使用该端口
2	源 1 到位	高电平、低电平	同一蒸发源所有坩埚共用一个到位信号。成膜开始时刻判断。
3	源 2 到位	高电平、低电平	同上
4	源 3 到位	高电平、低电平	同上
5~12	源 1 坩埚 1~8	高电平、低电平	坩埚到位一一对应方式成膜开始时刻判断。
13~20	源 2 坩埚 1~8	高电平、低电平	同上

21~24	源 3 坩埚 1~4	高电平、低电平	同上
25~29	源 1 位 0~4	高电平、低电平	坩埚到位二进制编码方式 若未分配位端口，则略过该位。 成膜开始时刻判断。
30~34	源 2 位 0~4	高电平、低电平	同上
35~36	源 3 位 0~1	高电平、低电平	不可用
37	禁止失效	高电平、低电平	禁止成膜时输出晶振失效 成膜过程中判断。
38	允许成膜	高电平、低电平	允许成膜的外部条件
39	保持阶段	高电平、低电平	蒸发过程停留在保持阶段，直至该信号撤除
40	开始命令	上升沿、下降沿	即时命令
41	停止命令	上升沿、下降沿	即时命令
42	厚度清零	上升沿、下降沿	即时命令
43	功率加	上升沿、下降沿	即时命令，当前输出功率增加 0.1%
44	功率减	上升沿、下降沿	即时命令，当前输出功率减少 0.1%
45	下一层	上升沿、下降沿	即时命令，在停止状态下转入下一层
46~50	膜系位 0~4	高电平、低电平	膜系位
51~53	晶振片位 0~2	高电平、低电平	多探头，当前晶振片位

部分功能因很少用而被禁，若用户需求，可联系本公司。

1 功能，就是不使用该输入端口；

2~36 功能，是蒸发源坩埚的到位方式，一个蒸发源只能有一种坩埚到位方式。到位方式可参考 2.8 节。

37，禁止失效功能，若未分配端口号，则不禁止。

38，允许成膜功能，是成膜的外部条件。若未分配端口号，则始终允许；若分配了端口号，但该外部条件尚未成立，此时按<开始>，则 XDM 等待外部条件成熟后，自动启动成膜过程。若在成膜过程中，外部条件丢失，则停止成膜。

39，保持阶段功能，若未分配端口号，则按正常阶段设定成膜。

40~42 功能，都是即时命令，它们的有效方式为端口电平发生上升或下降的跳变。仪器检测到这些端口电平跳变后，将立即启动相关命令。

43、44 功能，即时命令。当前功率输出端口(材料 0 的蒸发源)额外增加或减少 0.1%。总的源功率仍限制在材料 0 的上下限中。当停止时，将清零此额外功率。

45，下一层，即时命令。在非成膜状态下，该命令将使得成膜参数进入下一层，并自动将初始成膜厚度清 0。

本仪器中，蒸发源与坩埚之间的关系，是一对多。蒸发源是材料蒸发的能量提供者，既可以是阻蒸，也可以是电子枪、磁控源等。坩埚是盛放材料的容器。以电子枪为例，一只电子枪蒸发源，坩埚形式可以为多点坩埚、环形坩埚或饼状坩埚。

只要共用一个功率输出(SOURCE)的所有坩埚就看做是同一个蒸发源。在本仪器中，一个蒸发源只能有一种坩埚到位方式，并且在同一时间只能使用一个坩埚。

对于输入功能，如果没有设定对应端口，则略过对该功能的检查。例如，设置了蒸发源 1 的坩埚到位方式为<单输入>，但在<输入端口及源配置>中未分配对应的 <源 1 到位>端口，则源 1 默认始终到位。

对于继电器输出的外设(如坩埚控制器)来说，可将XDM输入公共参考地(图 2.4 中 GND)的任一针脚与输入端口针脚(如 sys-18)连接在外设继电器的两个输出端口。并将输入端口有效方式设置为<低电平>有效。这样，当外设输出继电器闭合时，XDM 的输入端口与 GND 连通，即可检测到对应输入端口处于有效状态。

所谓输入即时命令功能，是指某个时刻发生的特定命令，即在输入端口出现变化的时刻进行判读。其有效方式为<上升沿>或<下降沿>。

例如，外接一个按钮开关，用电缆线将其两端分别连接到指定的 XDM<开始命令>输入端口以及输入共地端。这样，当按钮开关未按下时，输入回路在外部是断开的，但输入端口由于内部有上拉电阻，读数为 1，即高电平。当按钮按下，XDM<开始命令>输入端口通过按钮开关与输入共地端连通，被拉低，读数为 0，即低电平。按钮按下时刻，XDM 将判断出该电平由高到低变化形成的一个下降沿，如果该<开始命令>有效形式设定为<下降沿>，则 XDM 将执行<开始命令>动作。如果该<开始命令>有效形式设定为<上升沿>，则 XDM 将在按钮弹起形成的由低到高的上升沿时刻才执行<开始命令>动作。为了抗干扰，XDM 只有在连续两个扫描周期都判断到相同电平，才确认该电平。所以，为确保正确响应，外部按钮按下的时间至少要保证两个扫描周期，即 200ms 以上。

2.7 输出端口自定义配置

XDM 共有 10 个继电器输出端口，与输入端口一样，每个输出端口也均可自定义配置。

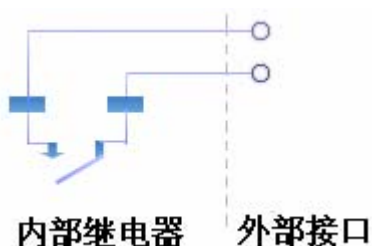


图 2.6 XDM 输出端口

如图 2.6 所示，每个输出端口都是一个常开继电器的输出端，对应接口的两根引脚。继电器额定电流 2A，额定电压 30V(DC)/250V(AC)。

当内部某个条件达成，并且分配有输出端口，则该端口的继电器将闭合，否则断开。例如，当晶振失效时，对应端口继电器(若分配)触点闭合；当晶振频率有效时，对应端口继电器触点断开。

共有 48 个输出功能，每个输出端口都可以任意分配为其中之一。与输入功能一样，同一功能不应分配到两个端口。

表 2.5

功能号	名称	动作方式	备注
1	未分配	无	
2~4	源 1、2、3 驱动	环形或饼状开始时闭合，停止时断开。点坩埚到位后立即断开。	适合驱动转动类坩埚，如环形和饼状坩埚或只需要单驱动的点坩埚。
5~12	源 1 坩埚 1~8	开始时闭合，坩埚到位后断开	一一对应驱动。若坩埚超时未到位，成膜停止并断开。 *此种用法极少见，6~8 停止使用。
13~20	源 2 坩埚 1~8	同上	同上
21~24	源 3 坩埚 1~4	同上	同上
25~29	源 1 位 0~4	开始时输出二进制组合	适合驱动二进制编码类坩埚。若设定二进制驱动，而未分配位，则略过该位。
30~34	源 2 位 0~4	同上	同上
35~36	源 3 位 0~1	同上	不可用

37	报警	报警条件达成时闭合，否则断开	
38	膜系完了	膜系全部成膜完了时闭合。再次开始时断开。	
39	晶振失效	晶振失效时闭合，有效时断开	
40	切换晶片	常开，接收到切换命令，输出单个闭合脉冲。	
41	晶片挡板	无	实际无此功能！***
42	厚度达到	膜层厚度达到时，闭合。开始时断开。	
43~45	源 1~3 挡板	进入成膜阶段时闭合，成膜停止时断开。	
46~48	附加 1~6 延迟	开始命令后，延时一定时间闭合，成膜停止时断开。	附加继电器。可以提供给蒸发源；也可在材料中指定。另外，材料中可延时闭合。而作为蒸发源附加，则无延时，开始命令后立即闭合。
49	<成膜开始>	开始预熔时刻闭合，成膜停止时断开	

XDM3 的输出端在端口连接位置上与 XDM2 不一样，但使用方法与功能 XDM2 是一样的。

2.8 蒸发源坩埚配置

XDM 共有 3 个 BNC 蒸发源功率控制端口，输出为电压形式，0~10V。此处所谓蒸发源坩埚配置是指对蒸发源的坩埚驱动及到位方式进行配置。以方便 XDM 自动进行坩埚位置控制。

2.8.1 驱动方式

表 2.6

功能号	名称	动作方式	备注
1	不关心	无	
2	单输出	环形坩埚，开始时闭合，停止	对应输出端口 源 1、2、3 坩埚驱动

		时断开。 点坩埚，则到位后立即断开！	功能。本功能端口不能作为当前蒸发源信号。请在蒸发源中设定附加继电器作为蒸发源信号。
3	一一对应	开始时闭合，坩埚到位后断开	对应输出端口 源 1 坩埚 1~8 之类的——对应功能。
4	二进制	开始时输出常规二进制组合	对应输出端口 源 x 位 0~y 的功能。
5	格雷码	开始时输出格雷码式二进制组合	同上 格雷码方式只使用四位编码。即最大控制 16 个坩埚。

如表 2.6，分为 5 种驱动方式，需要配置相应的输出继电器端口。其中二进制与格雷码对应输出端口的位功能。格雷码只提供 4 位编码对应功能，源 3 只有 2 个位，对应关系也是 4 位码。

表 2.7

十进制数	二进制数	4 位格雷码	坩埚号	XDM 输入端口 (二进制)
0	0000	0000	1	1111
1	0001	0001	2	1110
2	0010	0011	3	1101
3	0011	0010	4	1100
4	0100	0110	5	1011
5	0101	0111	6	1010
6	0110	0101	7	1001
7	0111	0100	8	1000
8	1000	1100	9	0111
9	1001	1101	10	0110
10	1010	1111	11	0101
11	1011	1110	12	0100
12	1100	1010	13	0011
13	1101	1011	14	0010
14	1110	1001	15	0001
15	1111	1000	16	0000

二进制法，源 1、2 可区别使用 32 个坩埚，源 3 可使用 4 个坩埚。而格雷码方式由于只使用 4 位，所以源 1、2 可使用 16 个坩埚，源 3 可使用 4 个。

高位在前，低位在后。例如格雷码驱动方式下，10 号坩埚号对应的位 3、位 2、位 0 为 1，位 1 为 0。驱动 10 号坩埚时，位 3、位 2、位 0 闭

合，位 1 断开。

在输出端口中配置相应的二进制位，若没有配置位，则忽略该位。

*表 2.7 中第二、三列为 0 代表坩埚控制器输出继电器断开，1 则代表闭合。XDM2 输入回路外部断开时为内部上拉高电平，为 1，而闭合到地，为 0。

2.8.2 到位方式

到位方式定义了 XDM 对蒸发源坩埚到位的判断方式。开始命令后，XDM 先驱动坩埚，然后等待坩埚到位信号，再行进入成膜预熔阶段之一的上升阶段 1。与驱动方式相似，也分为 5 种到位方式，

表 2.8

功能号	名称	判断方式	备注
1	不关心	无	XDM 驱动坩埚后，直接开始预熔
2	单输入	输入端口有效方式达成为真，否则为假	对应输入端口 源 1、2、3 到位功能。适合环形或饼状坩埚或其他共用一个到位信号的蒸发源。
3	一一对应	同上	对应输入端口 源 1 坩埚 1~8 之类的一一对应功能。
4	二进制	输入端口有效方式达成时，内部记为 1，未达成时记为 0	对应输入端口 源 x 位 y
5	格雷码	同上	同上 格雷码方式只使用四位编码。即最大识别 16 个坩埚。

若定义了蒸发源的到位方式，而没有分配相应的输入端口，则略过对该信号的判断。例如指定了蒸发源 1 为单输入形式的到位方式，而没有分配源 1 到位的输入端口，则 XDM 在开始后判断坩埚到位信号时，将立即判为真。再如指定了二进制方式，而没有分配某位，则略过该位的判断，即 XDM 默认该位始终为真。

二进制码与格雷码对应坩埚号也请参见表 2.7。

注意，表 2.7 中 0 代表输入悬空，XDM 由于内部有上拉，检测到的输入值为 1。当输入回路闭合时，XDM 检测到的输入值为 0，所以一般输入端口设为低电平有效。

举例，如二进制编码下，输入设为低电平有效，XDM 端口检测到的值为 1111 时(对应表 2.7 的 0000)，认为是坩埚 1。

材料参数中包含蒸发源号、坩埚类型以及坩埚号的设置。若坩埚类型设置为不用，则 XDM 将忽略蒸发源驱动及到位判断，即材料参数设置优先考虑。若需要正确驱动及到位判断，材料、蒸发源、输入输出端口都需要进行相应设置。

本章介绍的配置参数属于硬件安装配置，适合安装人员参考。系统配置参数还包括使用上的一些配置，可参考相应章节。

2.8.3 到位延迟

所谓到位延迟，即让 XDM 在判断出坩埚到位信号之后，延迟一个指定时间再停止转动坩埚。

坩埚驱动器在手动方式下，可自行驱动并控制到位。当坩埚驱动器拨到自动方式后，由外界的晶控仪来驱动坩埚转动并判断坩埚到位(不一定控制，见下描述)。

环形坩埚，由于正常工作时连续转动，所以无需设置到位判断，即不关心。

点坩埚，自动档位下，驱动与到位分两种类型

a. 驱动为单输出，到位为二进制

b. 驱动为二进制，到位为单输入

对于类型 a，开始时，晶控仪驱动坩埚转动，在判断到位后需要停止单输出驱动以停止继续转动坩埚，即停止转动的时机由晶控仪控制，到位延迟功能有效。对于类型 b，晶控仪输出坩埚位置二进制码驱动后，由坩埚驱动器判断是否到位并停止，即停止转动的时机由坩埚驱动器控制，到位延迟功能无效。

对于类型 b，需要晶控仪有较多的继电器输出端口，而晶控仪的输出继电器数目有限，而且承担了很多的外设控制任务。

类型 b 中，手动方式与自动方式下，停止坩埚转动都由坩埚驱动器控制。所以，这两种情况下坩埚的停止位置一致性好。

类型 a 中，手动方式由坩埚控制器控制停止，而自动方式则由晶控仪控制停止。由于某些型号晶控仪从输入抗干扰的角度出发，延迟一段时间才确认到位并停止转动。使得手动与自动方式下，坩埚的停止位置略有偏差。使用这些晶控仪的镀膜机，或许为迎合这种延迟，而有意识的在坩埚驱动器手动确认上附加延迟电路或软件延迟，以达到手动与自动时坩埚位置基本一致。

实践证明，这种晶控仪为抗干扰而设计的延迟稍长。在一些新型晶控仪设计中，这种延迟被很大程度降低，坩埚驱动器已无需有意延迟便可达到手动与自动方式下坩埚位置基本一致的目的。

XDM 采取了延迟很小(ms 级)的抗输入干扰设计，与新型坩埚驱动器配合良好。但为了兼容带附加延迟功能的坩埚驱动器。在坩埚到位方式下，增加了延迟时间一栏，用软件方法额外延迟一个用户任意指定的时间(0~10 秒，可分辨时间为 1ms)。这个额外延迟一般约为零点几秒，用户可视到位情况设定。

2.9 硬件配置举例一

图 2.7 是某镀膜机晶控部分的实际接线图。该镀膜机配有环形电子枪 1，带 12 穴坩埚的电子枪 2。枪 1 与枪 2 不能同时工作，枪选继电器断开为枪 1，闭合为枪 2。

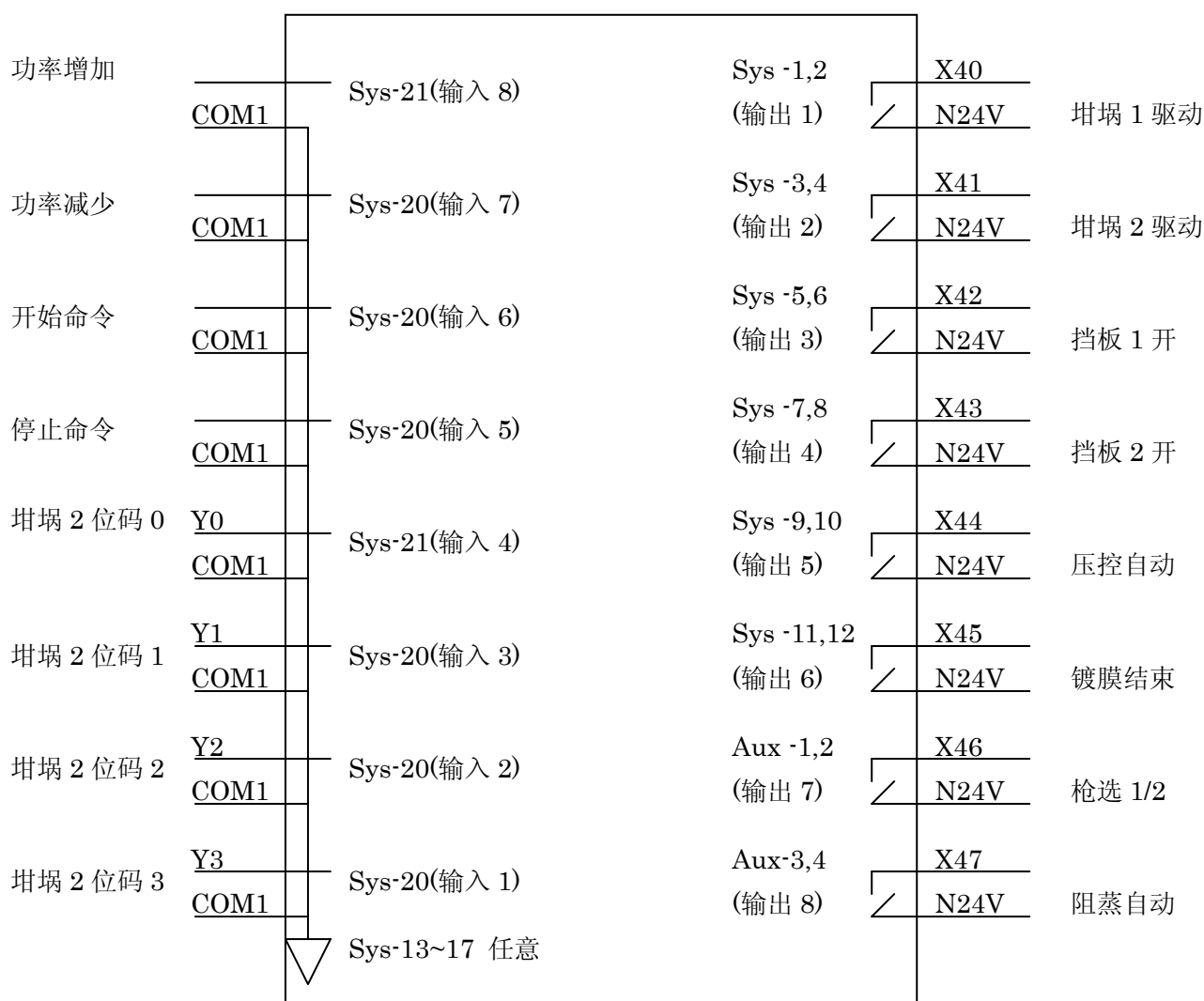


图 2.7 某一镀膜机晶控仪接线图

其中线上的注释 Y0、COM1、X40、N24V 等是镀膜机厂商自定义的接线编号。框内 Sys-21 是指 XDM 输入输出端口 SYS 的第 21 脚，它对应功能号为输入 4。而 sys-1,2 是指 XDM2 输入输出端口 SYS 的第 1 脚和第 2 脚，它对应输出继电器 1 的两端。框外的坩埚 1 驱动、坩埚 2 位码 0 是对端口用途的补充说明。

COM1 对应的是 XDM 的输入公共端(地)，它可以任意选接 SYS 的第 13 到第 17 脚。

端口用途说明中，压控自动、枪选 1/2、阻蒸自动三个功能与 XDM 内部定义没有对应，其它都

有对应。将有对应的 XDM 的输入输出配置成该用途。坩埚 2 位码 0~3 名称在 XDM 中为源 2 位 0~3。

如 2.7 节所述，XDM 可将输出端口定义为附加(延迟)继电器，并可将其在蒸发源或材料中指定。例如，如果蒸发源 1 要求该压控自动功能，则可将对应输出 5 配置成附 1(延迟)继电器，并在蒸发源的设定中指定附加继电器为 1。这样，当蒸发源 1 成膜开始后，附加继电器立即闭合。

对于枪选 1/2，断开为枪 1，闭合为枪 2。则可将输出 7 配置成附加(延迟)继电器 2，而在蒸发源 2 的附加继电器中指定为 2 号。当蒸发源 1 成膜开始时，附 2 继电器处于断开状态，而当蒸发源 2 成膜开始时，附 2 继电器闭合。即起到了换枪的作用。

对于阻蒸，可为源 3，可将阻蒸自动对应的输出 8 配置为源 3 驱动，而在蒸发源 3 的驱动方式中指定单输出。

注意，附加(延迟)继电器只在成膜过程中闭合，停止时断开（从开始到停止之间处于闭合）。另外附加(延迟)继电器与蒸发源并无对应关系，即蒸发源可以任意指定一附加(延迟)继电器。

假定枪 2 的某些坩埚号中需要压控自动功能。则可以在材料参数中指定坩埚号并指定附加继电器 1。对于枪 2 的另外一些坩埚若不需要压控自动功能，则不用指定。

源、材料中都能设定附加继电器，用户可根据需要灵活的配置。

输入方面，将功率增加、功率减少、开始命令、停止命令有效方式设定为下降沿触发，则当外接按钮开关时，按钮按下一次代表一次命令输入。对应端口连接至外部手动盒上的按钮开关，就实现了远程线控功能。

枪 2 对应的蒸发源 2 坩埚到位延迟时间，设为 0.4 秒，手动与自动的坩埚位置基本一致。

输入端口及源配置				2/4	
1 sys-pin18	源2位3	低电平	源1驱动方式	单输出	
2 sys-pin19	源2位2	低电平	到位方式	不关心	
3 sys-pin20	源2位1	低电平	附加继电器	不用	
4 sys-pin21	源2位0	低电平	源2驱动方式	单输出	
5 sys-pin22	停止命令	下降沿	到位方式	二进制	延迟
6 sys-pin23	开始命令	下降沿	附加继电器	2	0.400
7 sys-pin24	功率增加	下降沿	源3驱动方式	单输出	
8 sys-pin25	功率减少	下降沿	到位方式	不关心	
			附加继电器	不用	
输入共地端 sys-13, 14, 15, 16, 17				帮助	退出

图 2.8 例示 1 输入端口及蒸发源配置

继电器输出配置		3/4
1 sys - 1,2	源1驱动	9 aux - 5,6 晶振失效
2 sys - 3,4	源2驱动	10 aux - 7,8 报警
3 sys - 5,6	源1挡板	
4 sys - 7,8	源2挡板	
5 sys - 9,10	附1延迟	
6 sys - 11,12	膜系完了	
7 aux - 1,2	附2延迟	
8 aux - 3,4	源3驱动	
		帮助 退出

图 2.9 例示 1 输出端口配置

图 2.8 与图 2.9 是本示例一的配置结果。

图 2.9 中的继电器 9 与 10 在此镀膜机中未连接。若将继电器 9 的两个端点外接到蜂鸣器回路上，则可实现晶振失效时有声报警。继电器 10 也一样。

XDM 配置是灵活的，要满足本镀膜机的功能，对 XDM 配置并不唯一。例如，对于阻蒸(蒸发源 3)，既可以如本例中，设定源 3 驱动方式为“单输出”，并将输出端口 8 设定为“源 3 驱动”。也可将源 3 驱动方式设为“不关心”，而将附加继电器设定为“3”，在输出端口 8 设定为“附 3 延迟”。二者实质一样，输出继电器 8 在源 3 开始时闭合，停止时断开。

XDM 配置是开放的，用户不必局限于其名称。例如，如果源 3 需要某些特定外界条件，则可将源 3 的到位方式设定为“单输入”，“源 3 到位”输入端口接到外设的特定条件输出上。开始命令后，XDM 将等待到该输入端口条件达成，才会继续进行成膜操作。

图 2.8 与图 2.9 中所示接口 sys 与 aux 是 XDM-2 的接口，其对应功能号与 XDM-3K 中的 IO1 与 IO2 是一致的。二者的区别仅在于输入输出功能号与管脚的对应位置不一样。

2.10 硬件配置举例二

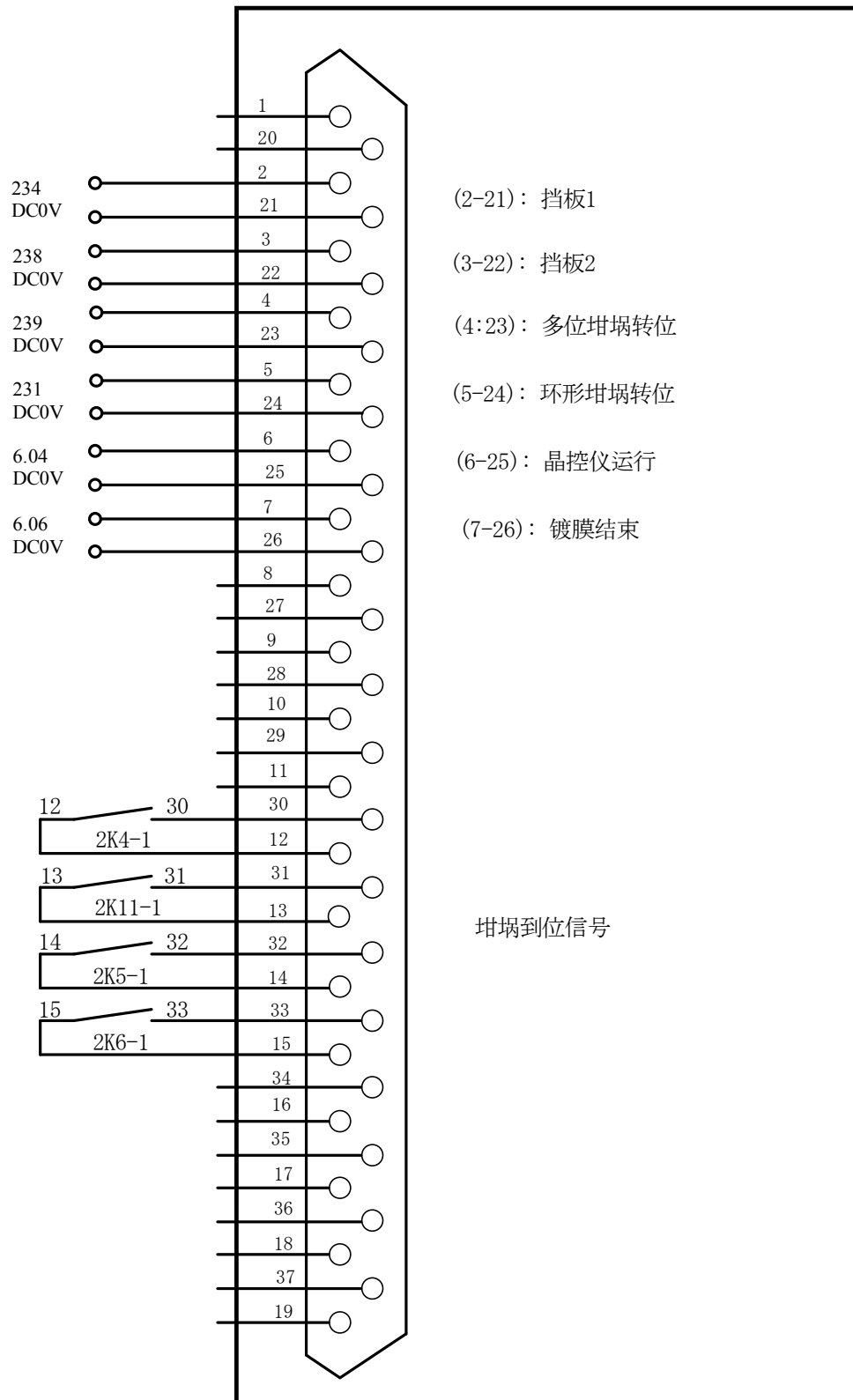


图 2.10 某镀膜机二晶控仪接线图

如图 2.10，是某镀膜机原始晶控部分接线图，因故改造成使用 XDM3 晶控仪。XDM3 的输入输出端口 I02 的硬件部分正可对应。所以外部接线无需任何改动，只在 XDM3 中进行 IO 口的软件重定义即可。

该镀膜机环形坩埚为枪 1，对应 XDM3 中的蒸发源 1；多位坩埚为枪 2，对应 XDM3 中的蒸发源 2。因环形坩埚无需到位信号，所以图下方的坩埚到位信号显然属于蒸发源 2 的坩埚到位信号，对应二进制码。

镀膜结束信号，在 XDM3 中有对应定义。

晶控仪运行信号，XDM3 中可连接到<成膜开始>。另外，XDM3 提供了可灵活配置的附加继电器。将蒸发源 1, 2 的附加继电器均选择为附加继电器 1(2、3 亦可)。这样当 XDM3 开始运行时，将闭合该附加继电器 1，等价于原来的晶控仪运行信号！

输入端口及源配置				2/4
1	16, 30	源2位0 低电平	源1驱动方式 单输出	
2	17, 31	源2位1 低电平	到位方式 不关心 延迟	
3	18, 32	源2位2 低电平	附加继电器 1	
4	19, 33	源2位3 低电平	源2驱动方式 单输出	
5	20, 34	未分配	到位方式 二进制 延迟	
6	21, 35	未分配	附加继电器 1 0.0	
7	22, 36	未分配	源3驱动方式 不关心	
8	23, 37	未分配	到位方式 不关心 延迟	
			附加继电器 不用	
输入共地端: I01 - pin24 I02 - pin12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19				帮助 退出

继电器输出配置				3/4
1 (14,15)(2,21)	源1挡板	9 (.) (1,20)	未分配	
2 (1,2) (3,22)	源2挡板	10 (.) (11,29)	未分配	
3 (3,4) (4,23)	源2驱动			
4 (5,6) (5,24)	源1驱动			
5 (7,8) (6,25)	附1延迟			
6 (9,10)(7,26)	膜系完了			
7 (11,12)(8,27)	未分配			
8(13,25)(9,28)	未分配			
				帮助 退出

图 2.11 某二镀膜机 XDM3 配置结果图

在配置该镀膜机晶控仪时，因原图纸中没有标明坩埚到位信号的位序号，第一次配置时沿用了图 2.8(示例一)的序号，在 <探头与接口>页面进行手动转动坩埚试验中，发现到位坩埚与实际坩埚号不符。将序号高低位颠倒后，再试即可。未发现坩埚位置不准现象，所以到位延迟时间设为 0。

图 2.11 中左半部分的数字，分别对应 IO1、IO2 两个输入输出端口的端口号。IO1 为 25 针，而 IO2 为 37 针。在本例中，IO1 并未使用。用户也可参照示例一中，将输入端口未配置部分配置成开始命令、停止命令。用外置连接线接入 IO1 即可实现控制开始与停止的线控，而无需破坏原 IO2 的接线！

XDM 输入输出端口可根据外部接线情况自由配置其功能。灵活运用好附加继电器、蒸发源驱动、到位信号等更可实现一些自定义功能。

附加继电器的设定十分灵活，在蒸发源和材料中都可以指定附加继电器。在材料中指定时，只要运行到该材料，则 XDM 将在预熔开始后延迟指定时间后闭合继电器。蒸发源中指定时，运行到该蒸发源，则闭合。所有附加继电器将在膜系停止时断开。例如，利用该功能可实现对指定材料充氧等。

<配置参数>配置完成后，应<保存>供以后开机使用。成膜操作人员请勿随意更改配置，若用户无意更改了某项硬件参数配置，不保存则不会影响以后开机的正常使用。

<配置参数>|<密码>用于保护硬件配置参数，需要在<保存>硬件配置参数之前进行<密码>|<确认>。新机器的默认密码为空，即处于无密码状态。

第三章 仪器使用

XDM 系列晶控仪使用的是彩色触摸屏，操作直观方便。本章介绍了基本界面及含义，并介绍了仪器的使用方法。不管用户是否使用过晶控仪以及何种型号晶控仪，新手上路一节将带您快速掌握 XDM 晶控仪的使用步骤。

3.1 人机界面操作

XDM2 使用的是 4.3 英寸触摸屏 (XDM3 使用 5.0 英寸)，可即时切换多国语言。人机界面友好，功能全面，界面有状态提示，还带有在线帮助功能，简单易用。下面介绍其中几个页面的使用，其它可参照。



图 3.1 操作界面

仪器开机后会出现初始页面，仪器序列号显示在初始页面的上方，几秒钟后系统自动进入操作界面，见图 3.1。

点击图 3.1 中按钮区域，可进入相应的命令状态或切换页面。除此之外，点击动态图形区，可清除当前区域的图形；点击告警提示区，将释放报警继电器。点击当前功率处可进入快速更改最大功率的界面！点击左下角<设定速率：厚度>处，可更改当前层设定厚度。点击屏幕下方其它地方，将出现图 3.1 下方的解释文字，十秒钟后自动回复。

<下一层>按钮将在开始后变成<暂停>。如果当前层未完成就停止，则<开始>按钮变

成<继续>，<暂停>变回<下一层>；如此时用户点击<继续>按钮，则重新开始当前层的预熔至成膜，起始厚度为停止前的厚度，以继续成膜。

图 3.2 的菜单界面，可从操作界面中点击<菜单>按钮进入，这个页面也是各页面之间的中转页面。从菜单页面可以看到，<操作>、<材料>、<膜系>、<运行参数>、<配置参数>以及<探头与接口>六个可选择命令，它们构成了仪器的全部基本功能。点击这六个命令，将进入相应的页面。除了操作界面，其它界面中的<返回>命令最终都将返回至菜单界面。

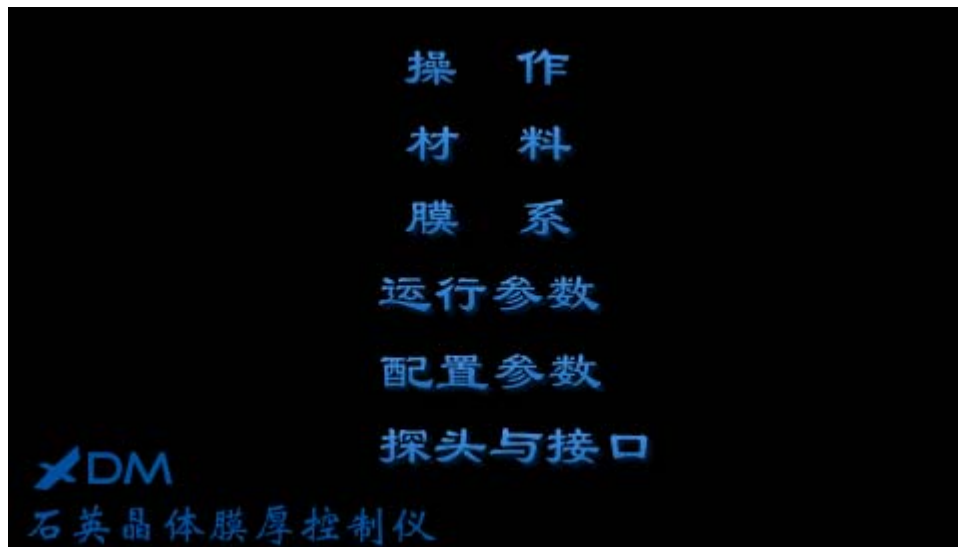


图 3.2 菜单界面



图 3.3 材料参数

材料界面，共有 4 个子页面，首先进入的是子页面 1，如图 3.3 所示。材料库位置是目标库序号，它是<保存>和<查看>的目标位置。而当前显示参数的材料库序号显示在状态栏，请不要混淆。系统可存储共 112 种材料，编号 1~112。

材料 0 是成膜时实际用到的材料参数，它属于内存中的参数，上电时初始化。通过串口可实时更改其参数，或在成膜开始时系统自动用膜系中指定的库材料复制进材料 0 中。当前显示的材料参数则是另外一个内存中的参数，它用于显示，并在各库材料中进行参数传递。

<查看>命令将目标库材料复制进该显示参数，而<保存>命令则是将该显示参数复制进目标库材料中。用户在界面修改的也是该显示参数。

左方有勾号的行是当前行，点击当前行右边的栏，则进入当前行编辑状态，即进入键盘页面。当点击右栏所在行不是当前行，则将当前行转至该行，即勾号会显示到该行左方。

材料各参数的含义请参见第 3.2.3 节。

从菜单页面可直接进入膜系界面，膜系界面具体请见第 3.2.2 节。

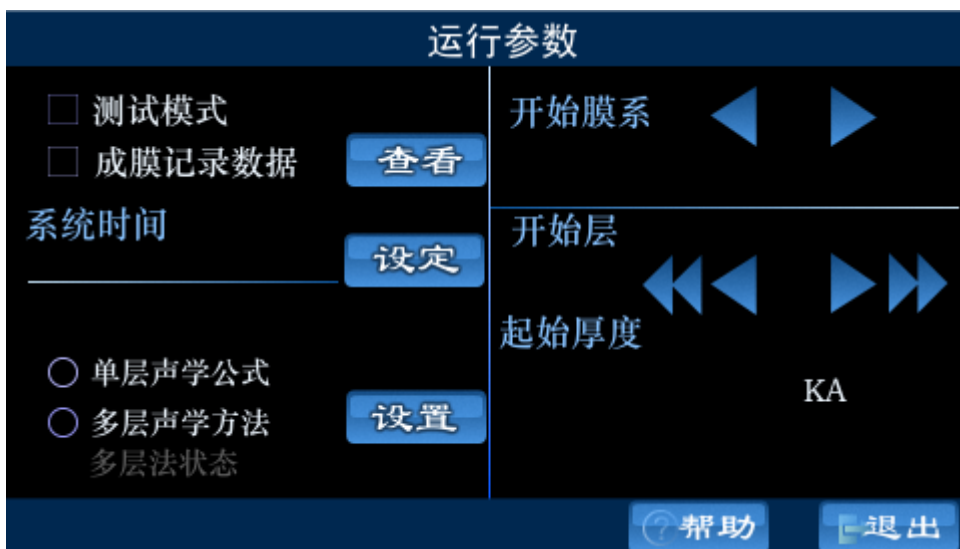


图 3.4 运行参数

菜单界面<运行参数>命令将进入如图 3.6 所示的运行参数界面。勾选<测试模式>进入测试模式，所谓测试模式，是留给系统设计方调试之用，对用户没有作用。

<成膜记录数据>勾选的情况下，将在成膜停止时刻记录成膜数据。<查看>命令查看过往的成膜记录，系统可记录 1000 多层数据，存满后循环覆盖。在运行参数界面，成膜记录数据选择状态可随着配置参数一起保存。

<系统时间>下方显示的是进入运行参数界面时系统内部的时刻。点击该栏可更改，然后点击<设定>命令，系统时间将在下次开机时有效。系统时间将出现在成膜记录数据中。

如第一章所述，<膜厚计算方式>是本仪器提供的特有选项，开机默认单层声学公式。若选择多层声学方式，还需要进入<设置>页面内进行初始设置。设置的内容包括新晶振片频

率以及过往的膜层及参数，以供多层声学法计算。对于新的晶振片，直接<设定新频率>；若晶振片有过往镀层信息，则<读存储信息>。系统内部仅记录一次过往镀层信息，<设定新频率>将删除以往信息。旧晶振片而且系统内没有相应的镀层信息，如选择多层法，厚度计算准确度尚不明确。

<开始膜系>、<开始层> 选择开始膜系及层号。操作界面的<开始>命令将从这里开始，一层完成后，系统自动进入下一层或人为点击<下一层>，此处的开始层号也将随之改变。<起始厚度>是指当前层开始前已有的厚度，当前层的总厚度在此基础上累计。用于层中途曾停止成膜，而又要继续完成层，此处可以更改。

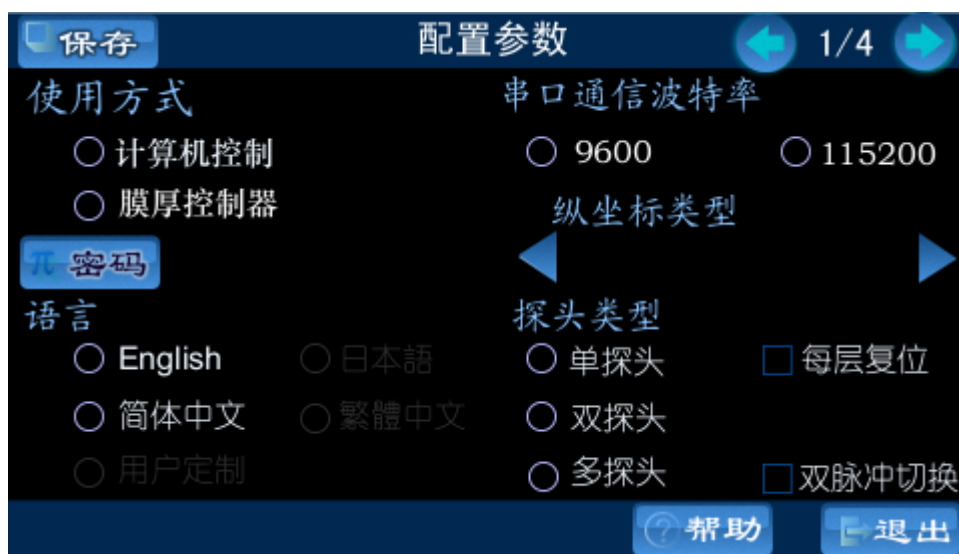


图 3.5 配置参数首页

系统配置参数，存储那些需要保存至下次开机使用的参数配置。共含有 4 个子页面。

图 3.5 中，<使用方式>中的<计算机控制>，是为了兼容某些机型只用计算机控制而保留下来的。<膜厚控制器>是让 XDM 成为主控的配置方式，这种方式下，当前层成膜结束后会自动取下一层参数(如果有的话)。

<密码>将进入密码输入及更改页面，在 XDM 中，若密码不为空，则在<保存>配置、材料、膜系参数之前，需要在此页面输入一次密码。<查看>不受密码影响。

<语言>下方的语种选项激活时，系统将即时进入该选项下的语言状态。

<串口通信波特率>，可选择为 9600 和 115200 之间任一。

<纵坐标类型>，系统提供速率、厚度、功率等参数纵坐标类型，并且上下限可以设定。这里的设置将在操作界面图形区域的纵坐标处出现。

<探头类型>，用于设定[切换晶片]功能继电器的输出方式。对于只支持一个探头接口的 XDM 型号来说，单探头与旋转六探头没有区别。



图 3.6 输入端口及源配置

图 3.6 是输入端口及源配置页面的空图形，具体含义可参考第 2 章中的 2.6 与 2.8 章节部分。配置完成后的页面可参见图 2.7。

图形左边是输入端口及其分配表，点击表格中右边半处(图中表格空白处)即可进入<输入分配>页面。点击蒸发源右边图中空白位置，即进入对应<蒸发源配置>页面。

第一行左列栏内的 <1 sys-pin18> 含义是 输入 1，其硬件位置在 sys 端口的第 18 脚（SYS 端口是 D 型 25 针公座，位于 XDM2 的后面板）。



图 3.7 是继电器输出配置页面，具体含义也请参考第 2.7 章节。

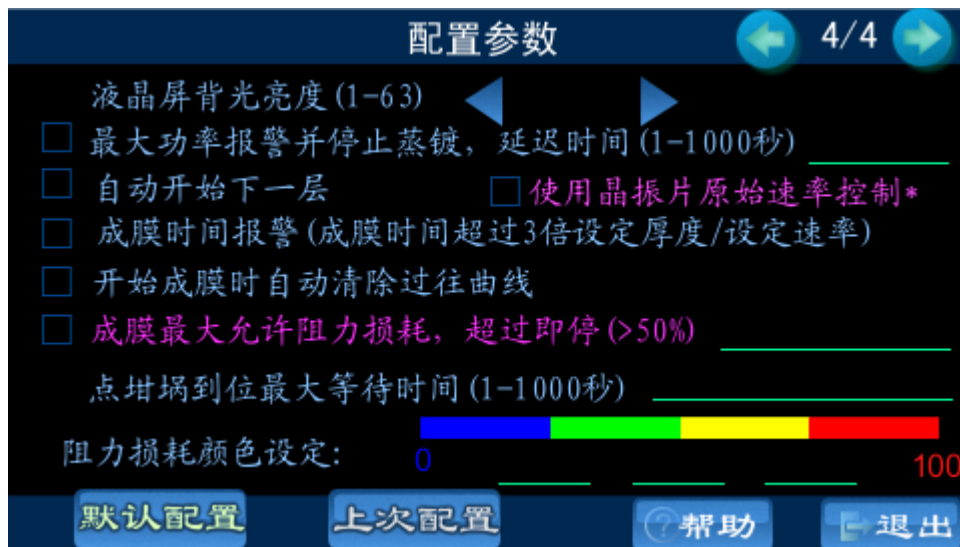


图 3.8 配置参数页面 4

图 3.8 配置参数页面 4 中，点击<默认配置>，系统将配置成默认状态，这对 XDM2 兼容某些机型是方便的。点击<上次配置>，将忽略当前配置参数的更改，恢复到上次保存状态。

使用晶振片原始速率控制：勾选后，晶控仪在控制材料沉积及显示速率时，将使用晶振片测量的原始速率作为**当前速率**。不勾选，则使用的**当前速率**为晶振片原始速率乘以材料**比例系数**之后的示在速率。

晶控仪的速率控制目标，是使得当前速率与材料内的设定速率值一致。勾选与不勾选的区别，在于使用的当前速率不同！

假定材料设定速率一定，当控制速率达到后，在未勾选的情况下，晶控仪的原始速率值是材料目标速率值除以比例系数。可见，每次控制的晶振片上的真实原始速率与比例系数是相关的。如果用户改变了比例系数，则晶振片上的真实原始速率也将随之改变，这会带来蒸发源功率、真空度、材料蒸发、沉积及膜厚分布等一系列的改变！这或会给成膜调试人员带来这样的困惑：只是微调了比例系数，波形是得到了校正，但外圈不能用了。

为了克服上述的问题，XDM 晶控仪增加了如是选项。

阻力损耗颜色设定，用于 XDM 显示频率与阻力损耗时的字体颜色。最左端的蓝色部分与最右端的红色部分都是需要用户必须予以注意的。具体值在出厂时已有初步设定，用户也可根据自身使用情况进行改变。绿色阶段表示晶振片状态良好，黄色阶段应引起用户注意。



图 3.9 探头与接口页面

图 3.9, 探头与接口页面, 是用于查看探头及接口状态。右方的接口状态及坩埚测试, 只用于测试输入输出是否正常; 平常镀膜时可观察, 但不宜操作。

<自检>命令用于检查晶控仪、振荡包及其连接是否正常。该命令执行后, 系统将进入自检状态, 并启动内部模拟晶振片(约 6.4MHz)工作, 用户可通过下方的频率与阻力损耗状态来判断。自检状态下不能成膜, 复位后即可。该命令需要硬件支持。

注意, 如果外部电缆处于短路状态, 则自检也不会正常。

<复位>命令用于重启频率查找状态, 并恢复至可成膜状态。

<切换>命令可用于更换晶振片, 同时重启频率查找频率。

<频率范围>, 系统默认为 4.98MHz~6.02MHz。用于设定正常使用的晶振片频率范围。晶控仪将只在该范围内查找晶振片的频率。如个别用户的晶振片初始频率稍高, 超过 6.02MHz, 可适当调高。

<频率与阻力损耗>即时显示当前的频率与阻力损耗, 此处的频率显示精度为 0.001Hz。

<输入状态>、<输出继电器>即时显示当前的输入输出状态。

<源坩埚驱动>, 可直接驱动坩埚, 适合安装期间调试。

系统还有其他一些页面, 基本操作同样很简单, 文中不再赘述, 可直接查看仪器。

页面下方, 若带有<帮助>命令, 点击后还会有简单的在线帮助。

系统中，频率状态分扫描、晶振失效和锁定三种状态。初始是扫描状态，在全范围扫描两次都未锁定频率，则输出晶振失效，若锁定频率，则进入锁定状态。在非锁定状态下，显示的频率前有负号，串口查询频率也是如此，而操作界面的频率处则不显。

系统在接收到<切换>命令，先控制晶振片切换继电器按一定时序闭合及断开，之后再重新启动扫描状态。在系统开机状态下，若通过其他方式更换了晶振片，此期间系统有误锁定频率的可能性(概率低，系统有一定自恢复功能。此时的现象是频率存在较大范围漂移，且因为频率不在真值附近，其阻力损耗值将达到 100%左右!)。关机再开机或<复位>都能确保重启频率扫描。

在某兼容方式应用下，成膜期间若外部自行更换了晶振片，系统也可由某输入口的变化而感知，从而会自动重启频率扫描。

为方便调试，输出继电器的方格子内，可以点击切换对应继电器的输出状态。格子较小，点击时请留意。

3.2 系统使用介绍

XDM 若作为兼容某些机型而保留的<计算机控制>方式使用。该方式下，计算机及其支持系统完成了许多幕后控制工作，本仪器仅作为一个速率显示及控制、厚度累积监视器使用，而且这些参数会被计算机实时读取并 LOG，用户几乎无需操作本仪器(除了开关)。

若使用在<膜厚控制器>方式下，XDM 可自动控制坩埚位置、蒸发源功率，并可根据用户设置切换成膜参数。本节主要介绍这种方式下的使用。

在系统安装时，安装人员可参照第 2 章接口部分、第 3.1 节中配置参数部分以及在线帮助等，完成硬件连接及正确的参数配置。

成膜技术人员的工作主要是设计好工艺参数、膜系参数、材料参数以及根据成膜结果进行参数调整等，涉及到本仪器方面的主要内容是膜系参数和材料参数。

3.2.1 成膜流程

参见图 3.10 系统成膜流程图，成膜开始时刻，系统首先将当前膜系参数中的运行参数复制进运行期参数(膜系首页的几个参数，见图 3.4)，并复制当前层材料参数至运行材料参数(也是库 0)、复制当前层厚度至运行层厚度。然后驱动坩埚转动，并等待到位。坩埚到位后，进入预熔阶段直至成膜阶段。成膜阶段，系统实时控制速率(如果连接)，并实时判断厚度是否达成。层厚度达到之前，若发生异常(主要是晶振失效，且膜系参数不允许继续成膜)或接收到<停止>命令(来自界面、输入端口或串口)，系统将暂停成膜。当层厚度达成，系统将完成当前层的镀制，并判断是否自动转入下一层。

XDM 系统仅在进入预熔阶段之前，判断坩埚位置，成膜过程中不检查。

系统控制成膜的全部参数，都处于内存中，<开始>前从存储器中读取进内存，成膜过程中也可通过串口或人机界面更改。

运行期材料参数能通过保存进材料 0(就是运行期参数)中实时修改，而层的设定厚度在操作页面左下方提供实时修改，最大功率限制在操作界面也可随时修改。

需注意的是在<开始>后修改才有效，因为<开始>时会读取新的参数以覆盖内存参数。这些修改属于运行期临时修改，不会影响存储的膜系及材料参数。

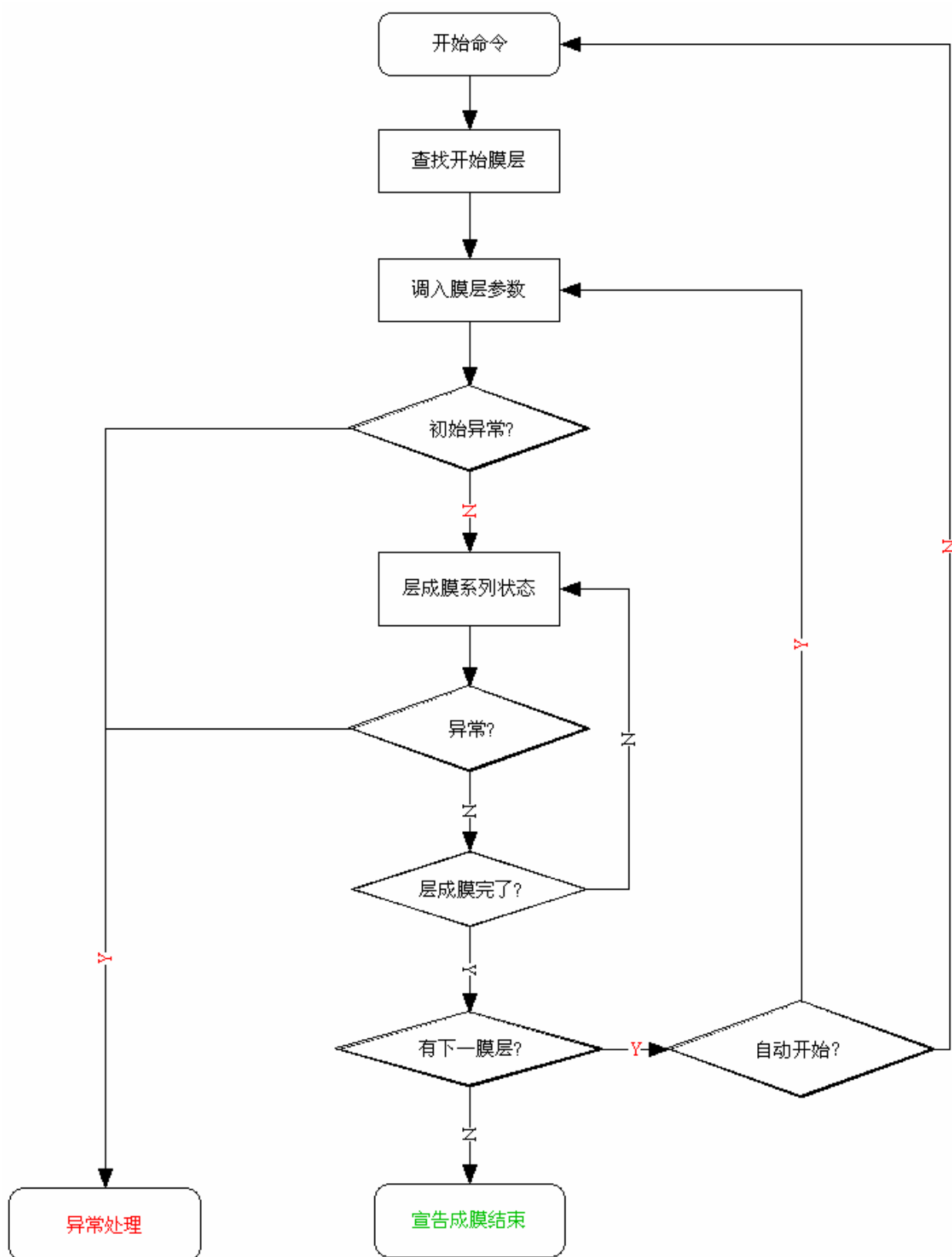


图 3.10 系统成膜流程图

3.2.2 膜系

在光学薄膜中，用中心波长表达的膜系可以是这个样子的，

$$G|(LHLHL2HLHLH)^3L|A \quad \dots<3.1>$$

中心波长为某 nm，L 代表某低折射率材料，H 代表某高折射率材料。G 代表基板，A 代表外界，通常是空气，这两个参数也常以其他形式出现。只要知道了材料的折射率、设计波长，那么这个膜系的光谱特性就完全确定了，可以通过光学薄膜软件计算得到。此处字母 L、H 代表光学厚度为 1/4 中心波长。

在光学薄膜软件中，通常还允许另一种用物理厚度表达的膜系方式，假定 L 材料折射率为 1.4，H 材料折射率为 2.2，中心波长为 1000nm。则可通过 光学厚度 = 折射率*物理厚度 这个关系式进行转换

$$G|(178.57L113.64H178.57L113.64H178.57L227.27H178.57L113.64H178.57L113.64H)^3178.57L|A \quad \dots<3.2>$$

<3.2>式字母 L、H 之前数值的是各层的物理厚度，单位是 nm。

注意，本系统沿用传统晶控仪的习惯，膜层厚度的单位是 $\text{\AA}$ ，速率单位是 $\text{\AA}/\text{Sec}$ ， $1\text{K}\text{\AA} = 1000\text{\AA} = 100\text{nm}$ ，输入时注意单位转换。

如要将 <3.2>式的膜系设计进系统中，可先设置好材料参数 L 和 H，存储在材料库 m、n 中。依次在膜系的膜层编辑页面(图 3.5)输入各层厚度、选择材料 m 或 n。最后选择一个膜系目标库，<保存>即可。

本仪器中，膜系是指由一个或多个膜层组成的膜层系列，每层的参数包含材料及其厚度。这个含义与光学薄膜中的膜系含义是一致的。

系统成膜是依次镀制完成某一个膜系所有层的过程。

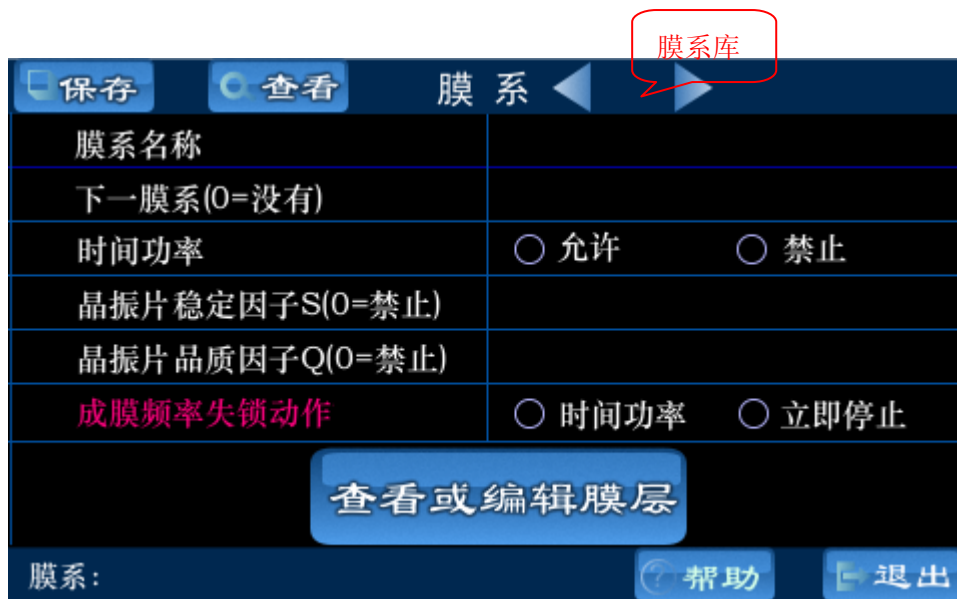


图 3.11 膜系首页

图 3.11 是膜系界面的首页。与材料界面一样，膜系库位置是目标库序号，它是<保存>和<查看>的目标位置。列表中是膜系的一些参数，<查看或编辑膜层>命令将进入膜系中膜层的编辑页面。选择目标膜系库，<查看>命令将复制目标库至内存中，该膜系的序号和层数将显示在状态栏中。<帮助>页面将看到本页面的说明，此处不赘述。

<膜系名称>是可自由定义的字符串，将显示在操作页面。

<下一膜系>是指当前膜系完成后是否还有下一个膜系需要连续镀制。XDM 中一个膜系最大允许 112 层膜，若一个完整膜系超过 112 层，则可以将前 112 层储存在一个膜系库中，后面的层储存在另一个膜系库中。在前一个膜系的<下一膜系>处填写另一个膜系的库号。XDM 系统没有膜系 0，所以，0 代表没有下一膜系。

<时间功率>若允许，则当成膜过程中出现晶振失效时，系统会用之前的平均功率继续镀制，此时的速率输出为设定速率(真实速率不知道)，并用此累积厚度。若禁止，则当成膜过程中出现晶振失效时，系统停止成膜。

<稳定因子 S>和<品质因子 Q>是为了兼容某些机型保留的参数，一般取 0 即可。

<频率失锁动作>，成膜中从频率锁定到失锁的瞬间所晶控仪采取的措施。立即停止还是使用时间功率。



图 3.12 膜层编辑页面

点击膜系首页的<查看或编辑膜层>，则进入膜层编辑页面，如图 3.5。

每个膜层的参数很简单，只有厚度和材料及坩埚三个参数。前面的层号由系统自动生成，不可编辑。与材料页面相似，点击厚度列栏，若属于当前行，则进入厚度编辑，若不属于当前行，则将当前行设置到该行。

膜层厚度是膜层的基本参数，此处单位是 KÅ。

材料库号是膜层的另一个基本参数，随后的材料名不是独立参数，只是材料中存储的名称，方便用户填写材料时参考。若填写的材料号为空，则随后的名称也为空；虽然在保存膜系时不会有问题，而在成膜时将会因为读取不到材料而发生错误，请用户予以注意。

<删除>和<插入>两个命令是针对当前行的。<添加>命令则在所有层的末尾添加一层，系统自动给出的初始参数是材料 1，厚度为 999.999KA。

3.2.3 材料

如 3.2.2 所述，某层膜的控制参数除厚度外，那些相对复杂的过程控制参数都包含在材料这个参数中。系统提供了 112 个参数空间。

膜厚控制器方式下，运行期参数从膜层指定的库材料中读取，也可在开始后通过更改材料 0 来实现。材料 0 就是运行期材料参数，参数修改后要<保存>至材料库 0 中才有效。

材料的参数中，大致分为如下几类：

计算厚度的参数，如声阻抗率、密度；

目标速率及其控制参数，如沉积速率、比例系数、PID 各参数；

蒸发材料来源参数，如蒸发源及坩埚；

预熔阶段参数，如上升时间 1、保持功率 1、保持时间 1、控制延迟时间等；

其他参数如 材料名、附加延迟继电器等。

保存		复制		材料		页 1/4		保存		页 2/4	
✓ 材料名						点坩埚号(膜系中指定)					
声阻抗率						坩埚类型		☐ 不用 ☐ 环形 ☐ 点			
密度(g/cm^3)						蒸发源		☐ 1 ☐ 2 ☐ 3			
沉积速率(A/S)						成膜功率控制方式		☐ 自动控制/定功率			
功率上限(%)、步进上限(%/秒)						自动控制参数模式		☐ ITAE ☐ PID ☐ PI			
最大功率(%)、最小功率(%)						P 比例					
						I 积分时间(秒)					
比例系数 1、2(双探头)(%)						D 微分时间(秒)					
状态: 材料速查 退出 状态: 帮助 退出											

图 3.13 材料参数 1, 2

保存		页 3/4		保存		页 4/4	
✓ 控制延迟时间(秒)				✓ 保持时间2(秒)			
附加继电器(0=不用,1~6有效,共3个)				上升时间3、定(秒,=0则不用3)			
继电器坩埚到位后延时(秒)		<开始>即闭合		保持功率3(%)、定功率			
上升时间1(秒)				保持时间3(秒, 定功率时无效)			
保持功率1(%)				最大功率延迟时间(秒)			
保持时间1(秒)				补偿厚度**(A)			
上升时间2(秒)				挡板开时脉冲(继电器号,脉宽秒)			
保持功率2(%)				挡板关时脉冲(继电器号,脉宽秒)			
状态: 帮助 退出 状态: 帮助 退出							

图 3.14 材料参数 3, 4

如图 3.13，材料的坩埚可以指定不使用，若指定使用，则需要与蒸发源设置相一致，后者请参考第 2.8 节。

<控制参数模式>，是指控制参数的类型。若勾选<ITAE>，则为兼容模式，参数位置分别将变为 增益、时间常数、延迟时间这三个所谓的一阶延迟过程模型下的参数。若不勾选，则直接为 PID 参数形式。系统在控制蒸发源功率时，都会将这些界面参数转换为内部 PID 控制系数，使用 PID 进行调节。系统开机默认为兼容模式。

<附加继电器>，是为材料提供一个额外的继电器，这个继电器在上升阶段 1 开始时刻起，延迟一定时间后闭合，在成膜结束或意外停止时断开。目的是为了让同一蒸发源的不同材料(例如不同坩埚)有不同的配置。

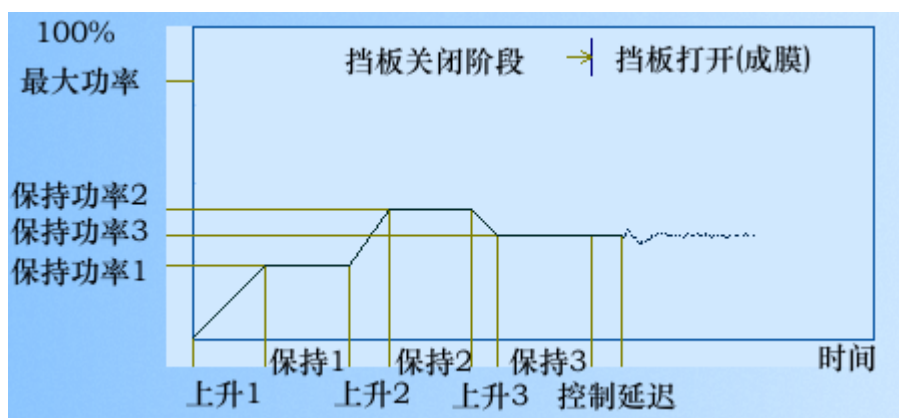


图 3.15 开始成膜阶段蒸发源功率图

在<开始>或<继续>命令后，如果有坩埚设定，XDM 将首先驱动蒸发源坩埚，并在判断到位后，开始如图 3.15 的预熔至成膜阶段。

系统提供了 3 个预熔阶段，若阶段 3 的上升时间取 0，则略过阶段 3，这也是为了兼容其他机型所做的默认设置。在最后一个保持阶段时间到达且没有保持阶段输入时，XDM 打开材料指定的源挡板，并进入控制延迟阶段。控制延迟时间达到，XDM 将开始通过 PID 算法，调节蒸发源功率，实现速率的闭环控制。

系统提供了三个可延时的<附加继电器>，每种材料可任选 1 个。在上升 1 阶段开始计时，时间到达后闭合，停止时断开。

<最大功率延迟时间>，进入成膜状态后，允许蒸发源输出的最大功率，从保持功率线性的升到<材料>中设定的最大功率所需要的时间。用户可根据自身工艺，与<控制延迟>一起，适当设定可有效防止成膜初始阶段的速率过冲！

<挡板开时脉冲(继电器号，脉宽秒)>，字面意思是挡板打开时刻，闭合一个指定的继电器，等待指定脉宽时间到达后，再断开该继电器。所谓挡板打开时刻，就是成膜进程进入挡板延迟时刻。可选择的输出继电器号为 1 到 10，直接指定输出端口号，而不论该端口的含义是什么。而如果不使用该功能，应将端口号设为 0。

<挡板关时脉冲(继电器号，脉宽秒)>，字面意思是在挡板关闭时刻，闭合一个指定

的继电器，并等待指定脉宽时间到达后，再断开该继电器。所谓挡板关闭时刻，就是系统成膜停止时刻。输出继电器号的含义与上条一样。

挡板开/关时脉冲继电器的用途：有些镀膜机的挡板，并不是常见的只有开/关两种状态的气动挡板，而是用电机驱动式挡板。之所以用这种挡板，是因为要用一个挡板来遮挡几个蒸发源(电子枪、阻蒸)。对某个蒸发源来说，开挡板时按下<挡板开>按钮，保持一定时间，等待挡板转动到位后松开；关挡板时按下<挡板关>按钮，保持一定时间，等待挡板转动到位后松开。就是电机正反转，转动角度由转动时间来定。

为了模拟上述开/关动作，XDM 推出开关挡板时刻的继电器脉冲输出。可直接将 XDM 继电器的两个触点并联到<挡板开/关>按钮的两端。所谓的脉冲宽度，指转动时间，单位为秒，脉宽分辨率为 1 毫秒，脉宽精确率约 30 毫秒。

因为 XDM 只是模拟开关动作，并不知道挡板真实位置。所以在成膜之前，需要人工将挡板转动到蒸发源上方。对于多层膜成膜，多层之间挡板转动的衔接还要设计人员仔细安排。

材料设置中带有很多参数，每次全部修改十分麻烦且容易出错。XDM 只需要先点击<查看>某个材料库，然后修改要修改的部分参数，再选择新的目标材料库号，<保存>即可。

注意，更改了某材料库参数，会影响到所有使用此材料的膜系。

3.3 新手上路

3.1.1 页面系统

如 3.1 节所述，XDM 的页面系统分成了 <开机页面>、<操作>、<菜单>、<材料>、<膜系>、<运行参数>、<配置参数>、<探头与接口>等页面。

XDM 上电时首先显示的是<开机页面>，页面上方显示了本公司 LOGO 及本台仪器的序列号。在系统完成初始化后，自动进入<操作>页面。点击<操作>页面的<菜单>命令可进入<菜单>页面。<菜单>页面是各页面的联系纽带。

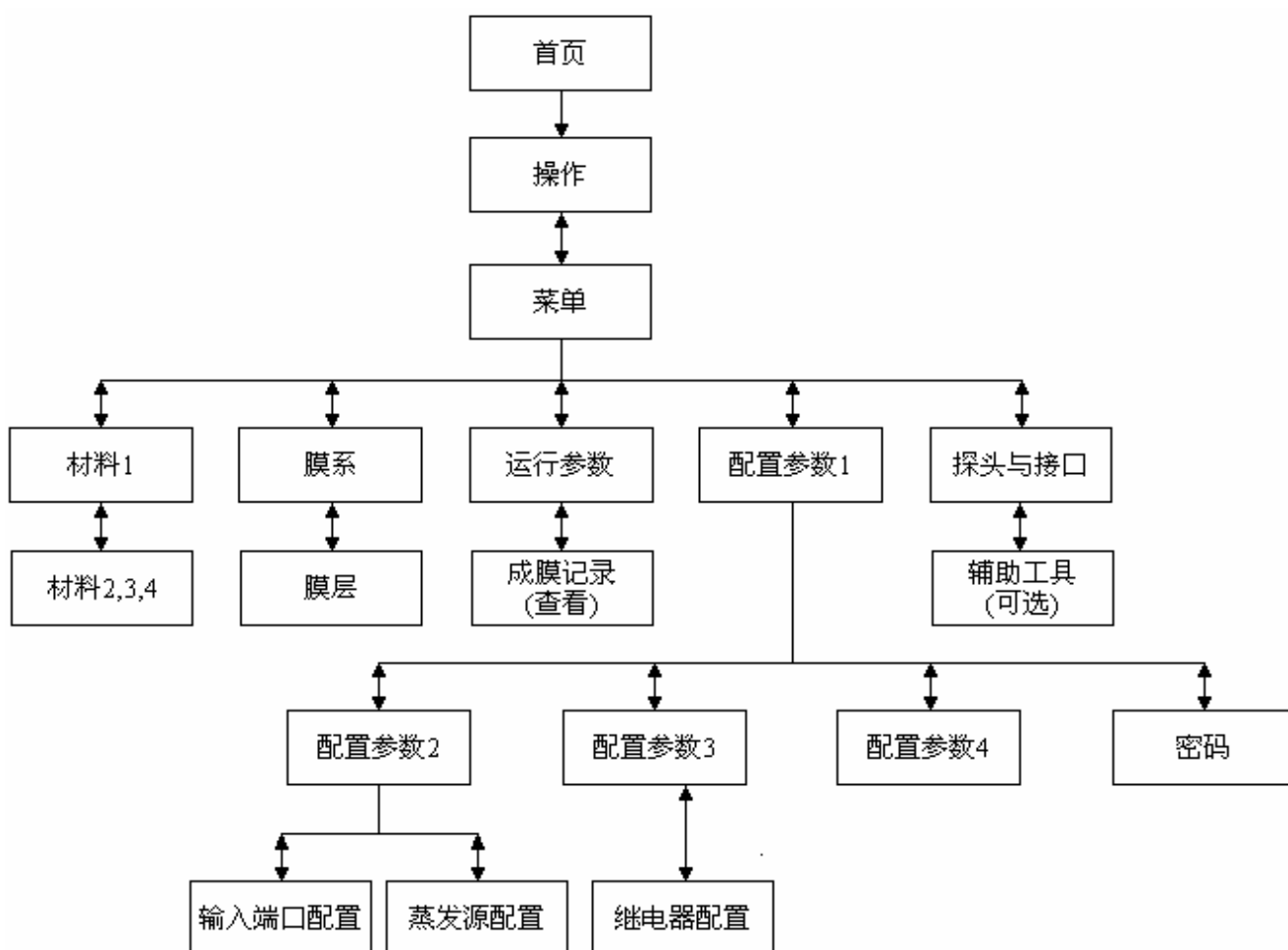


图 3.16 XDM 页面系统

图 3.16 是 XDM 的页面系统示意图，与 XDM 的页面内部联系方式略有不同。部分页面带有<帮助>页面，未在图中示出。

3.1.2 安装调试

晶控仪安装调试的任务是完成 XDM 硬件接口的规划与设计，制作除探头电缆以及电源线以外的所有电缆线，并进行实际电缆连接。

主要包括晶控探头、蒸发源坩埚驱动、挡板驱动、蒸发源功率控制、报警信号等。

3.1.3 成膜操作

成膜操作人员在接到膜系设计人员提供的膜系(膜层厚度及材料序列)后，按下列步骤实现成膜。

1. <膜系>页面输入膜系，并保存至某号膜系库中
2. <运行>页面选择第 1 步所输入膜系库号及起始膜层号
3. <操作>|<开始>成膜，直至所有膜层完成

在输入膜系的时候，需要分派好各膜层材料所在的坩埚位置。并注意至少复查一遍输入好的膜系。

第四章 通信协议

本仪器兼容部分其他机型功能命令，<计算机控制>模式下为单层膜控制，需要通过计算机来完成多层膜镀制。<膜厚控制器>模式下为膜系控制，膜系可为任意层膜(1~112)。

本仪器通信接口为标准串口，采取接收/应答 形式响应上位机命令。上位机在发送命令后，应在接收到本仪器的应答后，方可发送下一个串口命令，否则将得不到正常响应。

若发生超时未响应，上位机可考虑重发，重发三次若仍没有响应，上位机可关闭串口，之后打开再试。若依然没有响应，则可认为串口连接发生故障、有干扰、上位机端口异常或本仪器异常等。

4.1 串口配置

RS232 串行口；

XDM 机箱后置标准 D9 母串行口；

baudrate = 9600, parity = No, bytesize = 8, stopbits = 1

与上位机连接电缆两端针脚应一一对应。实际仅使用第 2,3,5 三个管脚，即只需这三个针脚连通即可。

其中波特率一项，可在配置界面中选择为 9600 或 115200。

4.2 基本命令格式

串口命令格式与相关上位机编程操作，请与我公司联系获取。

第五章 常见问题及对策

5.1.1 新晶振片安装后损耗不正常

正常新晶振片安装后，阻力损耗的颜色为绿色或黄色（值偏小）。如出现黄色（损耗值偏大）甚至红色，则说明测量存在问题。可依照以下步骤进行排查：

1. 重新安装一次；
 2. 再更换一个新的晶振片，以确定是否前一晶振片自身不良
- 平时注意清洗探头晶振片夹具，保持清洁，特别是内部。

5.1.2 晶振探头是否良好的快速检测方法

晶控仪延伸出来的振荡包通过 BNC 电缆连接至晶振探头的过真空法兰，电极穿过真空后，再通过耐高温电缆连接至探头晶振片夹具。任何一个出现问题，或者它们之间的连接出现问题，都会表现出晶振失效或频率不稳定。

拆开 BNC 连接，用万用表的二极管档或低档位欧姆档测量电极连接状况。

因探头两端分别在真空室的内外，一人检测不太方便时，可以想办法将一端先短路，再从另一端检查是否导通。

如果<探头与接口>界面显示频率锁不住，即频率值为负，在频率范围内来回跳动。此时观察损耗值，如果损耗值偏大，在 100%附近，断路的可能性比较大。如果损耗值偏小，在 10%以下附近，则短路的可能性比较大。

因晶控仪、振荡包及连接电缆存在故障时，都会出现频率锁不住，请参照 5.1.3 进行排除。

5.1.3 晶振失效或频率不稳定

1. 先排除是否晶控仪、振荡包及之间连接电缆问题：用<探头与接口>界面的<自检>功能，正常情况，将在下方显示内部自带的约 6.4MHz 模拟晶振片，相对很稳定。若不正常，请先检查连接电缆是否插接正常，插拔两次。若仍不正常，可拆开电缆两端的接头，检查是否有虚焊脱焊现象，注意不要遗落螺钉螺帽。

若仍无法正常，请与我们联系。在联络之前，可拍下<探头与接口>界面照片给我们，方便我们进行判断。

注意，如果探头侧电路处于短路状态，则自检也不会正常。短路状态下，频率锁不住，损耗值偏小。此时可以拔去通往探头的 BNC 电缆。通常探头侧常见的问题是断(开)路，可不拔。

2. 再请按 5.1.1，更换晶振片。
3. 按 5.1.2 检查晶振探头。

5.1.4 输入输出检查

1. 输入状态请参见<探头与接口>界面
2. 输出状态也请参见<探头与接口>界面。如果某继电器闭合，则对应指示灯亮，否则灭。调试时，可直接点击指示灯位置，对应继电器将发生闭合或断开。操作人员耳朵若贴近晶控仪，可听见继电器动作时发出的轻微“啪”声。若听不到此声，尽管指示灯亮灭，也可判断为晶控仪内部硬件故障。若碰巧点击的是<晶振失效>继电器，晶控仪会自动根据当前晶振状态对此进行更新。若听下来继电器有声音，而外部仍无动作，应重点检查外部连接电缆有无虚焊、脱落等问题；新机安装时，连接头出故障的可能也是存在的，查看是否有断针，或内陷。若仍未检查出问题，可用万用表直接量取对应输出继电器的连接插座两个管脚，是否正常闭合与断开。

5.1.5 坩埚不转动、不到位或到位与手动存在偏差

1. 坩埚不转动或不到位，通常在安装时发生。对于本机器，要使坩埚转动到位，需要以下几个条件同时成立，即<硬件配置>的输入、输出配置参数中配置相应的管脚，<硬件配置>中的源配置参数配置相应的驱动和到位方式，另外，容易忽略的一个地方是，材料中坩埚类型和蒸发源也要正确设置。

另外，当镀膜机侧发生坩埚转位信号异常，例如转动轴歪，也会导致坩埚信号不正常。此时就需要检测外部硬件条件了。

2. 点(穴)坩埚到位与手动时有偏差，这主要由镀膜机坩埚到位方面手动/自动转换的软硬件决定。在<配置参数>的源配置处，可通过到位延迟参数进行微调，这在驱动方式为二进制，而到位方式是单输入时，比较有效，到位延迟正是针对此而开发的。

本仪器内部没有需要客户维护的部件。如遇问题，请与供应商联系，或直接联系上海膜林科技有限公司。为便于沟通及快速解决问题，请事先将问题描述准备好。

公司地址： 上海市松江区施惠路 111 弄 5 号

电话： 13621983193

电子邮箱: 13621983193@163.com

QQ: 1292659135

第六章 一些说明

本章结合 XDM 的特点，讨论了石英晶体膜厚控制的一点点原理与几个常用术语。

6.1 XDM 如何实现成膜自动控制

XDM 成膜自动控制，就是代替人工，按照膜系设计进程，自动进行一系列的成膜动作，直至成膜结束。

XDM 蒸发源功率控制接口为 BNC 座，0~10V 模拟量输出。XDM 根据沉积速率对蒸发源按 PID 算法自动调节输出功率，以达到并稳定在设定速率附近。

XDM 对镀膜机其它部件的操控，如挡板、坩埚等，都通过数字式输入输出接口来完成。安装调试时，用电缆线将输入输出端口连接至镀膜机各部件，并在人机界面分配端口相应功能。成膜开始后，XDM 将根据自动按配置参数对输入输出接口操作，即可完成对镀膜进程的控制。输入输出端口配置请参见第 2 章。

参见 2.7 节，所谓 XDM 输出继电器，实际上是对外提供的一个单刀开关，由两个触点(端口)和一个常开开关闭成。输出继电器动作，就是将常开开关闭合。该开关可通过 250VAC/30VDC 2A 电流。在 XDM 的<菜单>|<配置参数>|<输出继电器>配置中，有具体继电器两个端口在 XDM 输入输出接口中的位置。如<输出继电器 1>的两个端口，在 XDM2 中，对应<SYS 接口>的第 1、2 两脚；而在 XDM3 中，对应<IO1 接口>的第 14、15 两脚，同时对应<IO2 接口>的第 2、21 两脚。其中 XDM3 中<IO1 接口>与<IO2 接口>中相同含义部分，在 XDM3 内部电路上并联。<SYS 接口>、<IO1 接口>、<IO2 接口>在 XDM 后面板上可看到字样。

例如，我们将 XDM3 的<IO1 接口>中的第 14、15 两脚（输出继电器 1）并联到蒸发源 1 的手动挡板开关盒按钮连线上，同时在<菜单>|<配置参数>|<输出继电器>配置中，将输出继电器 1 配置成<源 1 挡板>。则在成膜过程中，XDM 将可自动开关蒸发源 1 的挡板(当然，因为与手动按钮并联，手动按钮要处于断开状态)。另外，调试硬件时，我们可在<菜单>|<探头与接口>页面中，点击输出继电器 1 图标框，输出继电器 1 即可闭合或断开。

如果用户使用其它厚度控制方法如光学控制法，则需要将当前层的厚度值设的很大，避免晶控仪提前自动停止，当人工判断出膜厚到达时，人工点击<操作>|<停止>图标按钮，晶控仪将关闭挡板，并将束流调零。如果在应用其它厚度控制方法中，操作人员不方便及时点击 XDM 晶控仪界面按钮。可连接一个按钮式常开开关至 XDM 晶控仪，将按钮一个触点连接至 XDM 某个输入端(如输入 1)，另一个触点连接至 XDM 输入公共地。并在<菜单>|<配置参数>|<

输入端口及源配置>中配置输入端口 1 为<停止命令>、<下降沿>，按下按钮开关，等同于点击<操作>|<停止>图标按钮。如果是光学自动厚度成膜控制，则可在厚度达到时输出一个低电平信号至 XDM 输入端口 1，或继电器闭合信号给输入端口 1，或通过串口发送停止命令均可实现让 XDM 晶控仪停止镀膜。XDM 中，来自输入端口的停止命令，在未成膜状态下等同于<操作>|<下一层>的功能。

6.2 基本原理

石英晶体膜厚控制仪采用石英晶振片(又称石英晶体片、晶控片、水晶片等)作为传感器，通过实时检测晶振片的频率来感知膜层厚度变化，从而得知沉积速率；进而可通过调节蒸发源功率以实现速率控制，开关蒸发源挡板实现厚度控制。

对石英晶体施加电场，晶体会产生机械形变；反之，若施加机械压力而发生形变，则产生电场。这是所谓的压电效应，而且这种效应是可逆的。如果对晶体施加交变电压，就会产生机械振动，当这种受迫机械振动与晶体本征谐振频率一致时，就产生谐振。

石英晶体片中的机械振荡是一种声学波，对于通常使用的 AT 切割石英晶体片，它的振荡为厚度剪切(thickness shear)振荡模式，传播方向垂直于表面。这种声学波在石英晶体片的两个表面间来回反射振荡，谐振时的振幅最大。晶振片的背面电极被有意做成双锚状图案，并有一定曲率的球面，这样可认为所有声学波能量集中在晶振片中心附近。于是，这个振荡模型简化为一维剪切振荡声学波在复合材料(多层)组成的谐振腔中的自由谐振。

直观的理解，从晶体片一个表面发出的声波传播到另一个表面，在声速不变的情况下，所需要的时间必然跟距离（厚度）成正比。谐振周期必然随着膜厚增加而加大，即谐振频率随着厚度增加而降低！

6.3 厚度计算方法及多层膜算法

谐振频率的变化与膜层质量的变化关系式小议:

早期石英晶体谐振器的研究表明, 谐振频率变化与微小质量变化呈线性关系(Sauerbrey 关系式, 1950 年代末)。随着质量变化增大, 这种线性关系准确性开始变差。研究者们又发展出“周期法”, 即质量变化与谐振周期变化成正比, 这虽然扩展了能准确计算厚度变化的频率变化范围, 但似乎只是根据实验结果反过来对关系式系数的一种修正。

直到 1970 年代, 研究者意识到, 石英晶体谐振腔内的声学波在附着层中也有传播, 晶体片与附着层构成了一维声学复合谐振腔。从而附着层的声学参数也将必然出现在关系式中。



图 6.1

$$T_f = \left(\frac{N_{at} d_q}{\pi d_f F_c Z} \right) \arctan \left(Z \tan \left[\frac{\pi(F_q - F_c)}{F_q} \right] \right) \quad \dots (1)$$

式中 N_{at} 为 AT 切割石英频率常数, d_q 为石英密度, d_f 为附着介质密度, Z 为附着介质声阻抗率, F_q 为石英晶体片的初始频率, F_c 为附着介质时刻的频率, T_f 为附着层厚度。

(1) 式与单层膜试验结果是非常吻合的, 说明声学波模型是成功的。对膜层厚度的精确计算有极大的提高, 是当前石英晶体膜厚控制仪的主流算法。

这个看上去依然繁杂的式子为整理后膜层厚度表达式。二层(晶体片+单层附着层)一维声学谐振腔的原始解却是个更让人难以摸着头脑的关系式, 其推导过程也繁琐不堪, 难以直接推广到多层膜。鉴于此, **目前的晶控仪, 若未特别申明, 计算膜厚时, 使用的都是此单层公式。**在多层膜场合下, 为了得到最外层厚度, 仪器需要分别测量并记录起始与终了时刻的频率 F_{c1} 和 F_{c2} , 并将最外层的材料特性参数带入 (1) 式, 分别得出两个厚度 T_{f2} 与 T_{f1} , 最外层厚度则取二者之差。

可见, 这里计算最外层厚度时假设所有已镀层材料的特性参数与最外层一致。对于光学薄膜应用中, 这个假设通常不成立, 因此原理上就存在一定的计算误差。

本公司研究人员经过深入理论研究, 推导出多层膜情况下谐振频率的理论公式, 并进一步的转换为易实现的计算机算法, 实现了根据已镀膜层信息实时计算最外层的理论厚度。这种算法在本仪器中被称为多层膜算法, 相应的, 使用 (1) 式计算厚度的方法称为单层膜算

法。

XDM 同时提供了这两种算法以供选择，开机默认为单层算法。转换成多层算法时，必先进行设置。

完成多层算法设置后，XDM 将记录下晶振片上每层的声学相关参数，成膜过程中实时根据已知参数及当前频率演算最外层厚度。

对两种材料 TiO_2 和 SiO_2 组成的带通膜系“(L H L H L 2H L H L H)^3 L”模拟分析，假定中心波长 1000nm，用晶控仪控制膜层厚度，并且运用单层膜算法重复镀制此膜系，并假定两种材料的比例系数始终为 1。则 6MHz 晶振片用到 5.9MHz 时石英和氧化钛厚度的误差为 $\pm 0.1\%$ ，5.7MHz 时石英厚度误差达到 1.2%，而氧化钛约 0.8%，5.5MHz 时石英厚度误差为 3.2%，而氧化钛约 2.3%。这不是个精确数值，对不同膜层材料及厚度构成的多层膜，其偏差是不一致的。

本说明书挂一漏万，有兴趣的用户可参阅“Mass determination with piezoelectric quartz crystal resonators”, Chih-shun Lu, J. Vac. Sci. Technol., Vol. 12, No.1, Jan./Feb. 1975 等文献，并可通过其引用文献追根溯源。

6.4 阻力损耗

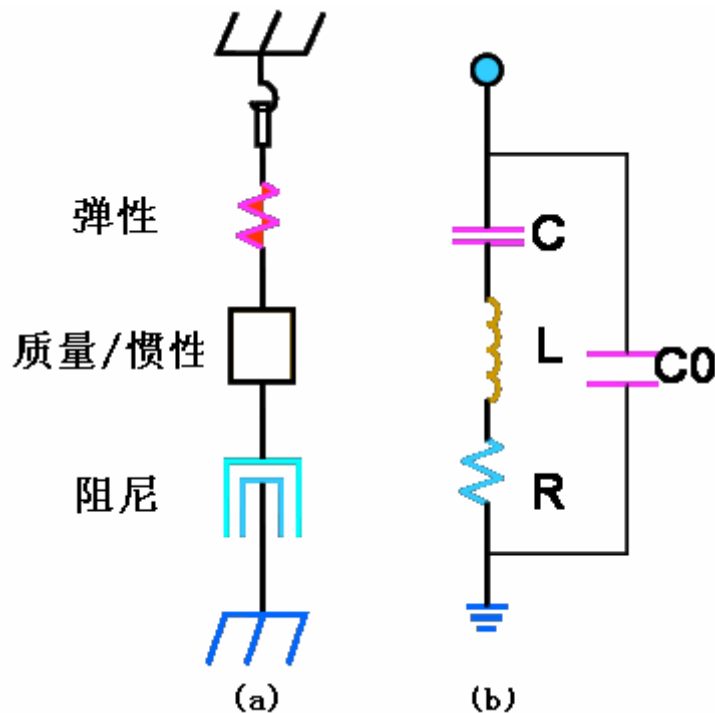


图 6.2 石英晶体片机械振动与电学模型

图 6.2.a 是石英晶体片机械振动的模拟模型，是一个带阻尼的弹性振动。图 6.2.b 是石英晶体片振荡的电学模型， C_0 是静态电容。 L 、 C 、 R 的值是可以通过网络分析仪等高频分析仪器测量出来的。尽管石英晶体片的 Q 值很高，但阻尼(或 R)是必然存在的(否则 Q 值无穷大)。阻力越大， Q 值越低，石英晶体片振荡抗干扰性能就越差。反应在成膜中就可能是速率稳定性越差直至晶振失效。

阻力损耗是 XDM 晶控仪特有的一个定性表征石英晶体振荡损耗的参数。它是石英晶体振荡的辅助参数，以百分比形式给出。(中国发明专利申请号为：201210425445.5)

在没有锁定频率的情况下，若阻力损耗在 100%附近时，说明探头连接电路接触不良或开路；若阻力损耗在 0~10%(低于正常值)附近，说明探头连接电路短路。

实践已经证明，阻力损耗参数在对晶振片的挑选及安装上可发挥指导作用。速率趋于不稳定情况下，也均伴随着阻力损耗值偏大，这与此概念的物理模型是相吻合的。在<操作>页面实时显示的阻力损耗值随着膜料的沉积而发生变化，也是一个有趣且值得深入研究的课题！

6.5 密度与声阻抗率

密度，单位体积内物体的质量，在 XDM 中它的单位为 g/cm^3 。

声波波振面某一面积上的声压与通过这个面积的质点速度之比，称为声阻抗 (acoustic impedance)，即 $Z_s = p/v$

式中， p 为声场中某点声压， v 为该位置媒质质点振动速度。通过一些变换，声阻抗还可以用 $Z_s = (d \cdot \mu)^{1/2}$

来表达， μ 是材料的剪切模量， d 是材料密度。

在 XDM 晶控仪材料的参数中，出现的并不是声阻抗，而是声阻抗率，它的定义为
声阻抗率 = 石英声阻抗 / 材料声阻抗

声阻抗率作为一种比率，是无量纲的。对于在两种不同介质中传播的声学波，谐振方程中用声阻抗表达。由于原始声学谐振方程中声阻抗是每项的乘积参数，同时除以石英声阻抗值，而仅用材料声阻抗率参数来表达。在本册附录中，列举了常用材料的声阻抗率。也有的晶控仪直接使用声阻抗值。

从(1)式可以看到，若 $F_q \approx F_c$ ，根据泰勒近似，则式中三角函数及反三角函数都可以拿掉，Z-ratio 值恰好抵消！所以，很小频率偏移下 Z-ratio 值的设定对膜厚计算的影响并不大，**对于 Z-ratio 值不详的材料，可以直接设定为 1.0。**

手册的附录中给出了一些物体体材料下的密度与声阻抗率表，XDM 的在线帮助中也列出了常用材料的密度与声阻抗率表。用户在使用这些材料前，请将其该参数输入到对应材料库中。

尽管，通常膜层材料的密度要低于体材料密度，而且膜层材料的声阻抗率与体材料的声阻抗率也不完全相等。但是，膜层材料的密度不准确性可通过厚度得以弥补，反应在样品片上，就是比例系数会不准确。

6.6 比例系数

比例系数 (Tooling Factor)，是以百分比形式表达的样品片厚度与监控片厚度的比率，由下式定义

$$TF = \text{样品片厚度} / \text{监控片厚度} * 100\%$$

此处的监控厚度可以是晶控中的晶振片测量厚度，也可以是光控中的 Monitor Glass 测量厚

度。

需要指出的是，XDM 输出厚度值(显示的测量厚度以及通过串口读取的厚度值)并不是内部测量厚度，而是已经乘以比例系数，转换成样品片的厚度读数。这样，只要 TF 值正确，XDM 输出厚度就等于样品片的厚度了。沉积速率也是如此。

确定比例系数(Tooling Factor)的方法:

1> 对于不知比例系数的情况，可先假定 TF 值为 100%。成膜后，记录下 XDM 显示厚度 Tmonitor。用台阶仪测量出样品片膜层厚度，或用分光光度计测量光谱后拟合出膜层厚度 Tsample。则 $TF = Tsample/Tmonitor$ 。

2> 对于已有比例系数为 TF1，需要进行修正的情况。成膜前，初始设定的材料比例系数为 TF1，假定成膜后晶控仪内部监控片厚度为 Tx(用户看不到)，显示厚度为 Tm，样品片厚度为 Ts，根据比例系数的定义，有

$$TF1 = Tm/Tx$$

$$TF2 = Ts/Tx$$

两式相除，即消除不可见的 Tx，得出

$$TF2 = TF1 * (Ts/Tm)。$$

可见，若令 TF1 等于 100.0%，就是情况 1>下的式子。

XDM 假定在成膜过程中这个比例系数不发生变化。而成膜的真实情况却十分复杂，这个比例系数不是一成不变的。层与层之间，甚至实时都会发生变化，但晶控仪只能按照设定的系数去输出厚度和速率，无法感知这个变化。用户应从整机配置及工艺的角度去保证这种变化在成膜结果可接受的范围之内。

6.7 PID 速率控制

PID 与速率控制小议:

所谓 PID 控制，就是对系统输入偏差进行比例积分微分运算，并用运算的叠加结果去控制过程执行机构，以达到减小偏差的目的。

以下是数字式增量型 PID 控制的输出公式，

$$\text{比例项: } \Delta Pp(k) = Kp \times (E(k) - E(k-1)) \quad <1>$$

$$\text{积分项: } \Delta Pi(k) = Ki \times E(k) \quad <2>$$

$$\text{微分项: } \Delta Pd(k) = Kd \times (E(k) - 2 \times E(k-1) + E(k-2)) \quad <3>$$

$$\text{总输出: } P(k) += \Delta Pp(k) + \Delta Pi(k) + \Delta Pd(k)$$

其中 K_p, K_i, K_d 分别为比例系数, 积分系数, 微分系数。

注意, 此处的比例系数是控制过程的参数, 与 XDM 定义的材料比例系数不是一个概念。

$E(k)$ 为第 k 次 当前设定值与测量值的差。 $E(k-1)$ 是第 $k-1$ 次二者之差, $E(k-2)$ 同样。

$P(k)$ 为第 k 次的输出值。符号“ $+=$ ”是计算机程序中的一个表达方式, 表示每次的增加量。

$P(0)$ 等于最后一个保持功率, 即系统在保持功率的基础上进行速率调节。所以, 保持功率如果能接近目标沉积速率的功率, 则可以得到更稳定的初始状态。

对于石英晶体膜厚控制仪, $E(k)$ 是速率偏差, $P(k)$ 是源功率输出, 也就是前文所述的执行机构。

如果系统稳定, 若某子项的数值合理, 那么该子项调节的结果将使得自身趋向于 0。

于是总输出的增量趋于为 0, 偏差 $E(k)$ 也将趋于 0。每一项过大, 系统都可能产生振荡!

P: Proportional, 比例。从式<1>可看出, 只要 $E(k) = E(k-1)$, 即偏差保持不变, 那么 $\Delta P(k)$ 就等于 0, 从而比例项的调节结果将不再改变。对于仅有比例调节的稳定系统, 最终会存在一个不变的静态偏差 $E(k)$ 。如果比例系数 K_p 偏小, 那么这个静态偏差会较大。但反过来, 如果比例系数过大, 不是静态偏差变小, 而是会出现振荡。

I: Integral, 积分。由式<2>可见, 积分项的参与会使得偏差 $E(k)$ 趋于 0。 $P(k)$ 增量的三项中, 只有积分系数 K_i 与积分时间参数 T_i 是成反比的。积分时间越长, 那么积分项的贡献越小, 系统偏离回复就越慢! 所以, 若系统回复慢, 可调小积分时间; 若调小积分时间后, 系统出现振荡, 则可再调大一些。

D: Derivative, 微分项。微分项式子右端可写成

$$[E(k) - E(k-1)] - [E(k-1) - E(k-2)]$$

如前所述, 微分项的调节趋势也是使得上式为 0, 即让两次偏差的变化率相等。

$E(k+1) - E(k)$ 也趋于 $E(k) - E(k-1)$, 即保持相同的偏差变化趋势。可见微分项会根据之前的变化 $E(k) - E(k-1)$ 来调节下一个 $E(k+1) - E(k)$, 这属于超前调节, 可加速调节过程。如果偏差变化率不等于 0, 那么微分项就会起作用! 由于真实系统中存在干扰, 假定某次 $E(k-1) = E(k-2) = 0$, 而本次由于某种干扰(下次不再发生)引起 $E(k) > 0$, 那么这种超前调节作用反而会使得下一次的 $E(k+1)$ 趋于更大! 所以, 微分项的存在虽然使得系统响应更快速, 但抗干扰变差。微分时间 T_d 与微分系数 K_d 是成正比的。 T_d 越大, 微分效果越强。

从增量式中也可看出, 如果系统达到稳定, 测量值等于设定值, 即有了偏差 $E(k) = E(k-1) = E(k-2) = 0$, 那么总的功率增量必然也为 0, 即功率不再变化, 与 PID 参数大小无关! 所以说, PID 参数的大小具有相当大的允差, 它的优劣反应在稳定建立过程和发生偏离后的回复过程。

实际控制结果是各项综合的效果, 此处单独列出是为了方便理解。以上对 PID 控制的解释, 是试图帮助用户从计算机控制这个角度去理解这个经典控制理论。它仅是作者对 PID 的理解, 肯定存在不对的地方。有兴趣的用户可参考过程控制理论来全面了解其基本原理。

若将 T_d 设为 0, 则 K_d 也为 0, PID 控制就等同于 PI 控制了。 T_i 设得很大, 也相当于 K_i 为 0, 就是纯比例控制了。

材料速率控制 PID 参数整定，最重要的是在实践中根据工艺及用户的经验去试凑，这有赖于用户对工艺的经验积累。一般的规律是先比例，再添加积分，后添加微分。

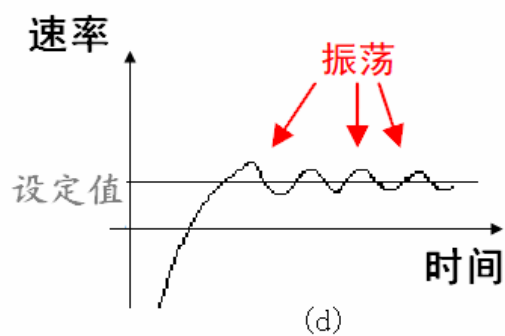
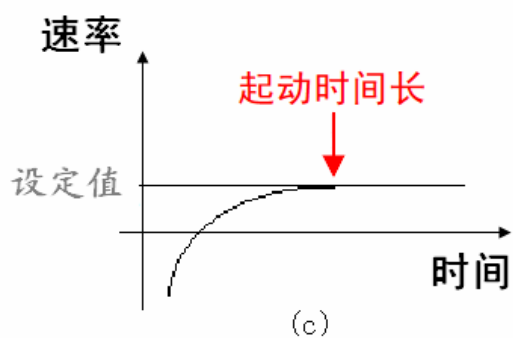
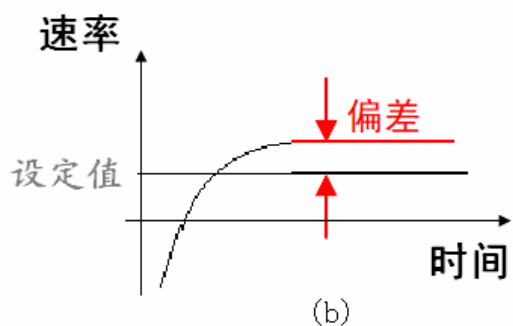
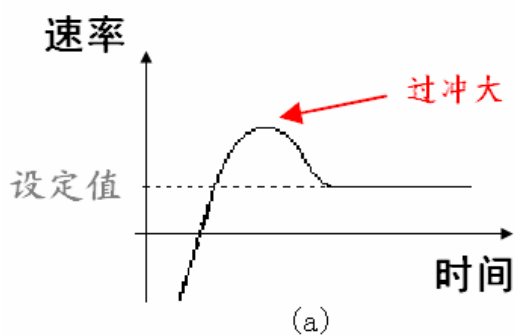
能否维持一个高可重复的成膜过程对成膜结果特别是规模化生产有决定性意义。成膜过程的重复性是个复杂的系统问题，稳定的速率和厚度控制是最重要的要求之一。对于光学薄膜来说，沉积速率的大小对成膜结果的影响不仅仅是时间上的快慢，还影响到牢固度、表面光洁度、分布均匀性、材料折射率等。

升华的材料，延迟时间短，如 SiO_2 ，特别是颗粒材料表面不平整，不同位置的状态不一，采用 PI 控制或更合适些。对于熔融状态较好的材料，可采用 PID 控制以得到更好的稳定性。一般的材料，使用 PI 控制都是可行的。没有一个通用参数，更有赖于工艺人员现场调试。PID 参数也不是一成不变的，需要根据用户的工艺条件改变而改变。

兼容 ITAE 状态下，蒸发系统过程模型为一阶延迟，三个参数分别为增益 (Gain)、时间常数 (Time Constant) 以及延迟时间 (Dead Time)。**这三个参数与 PID 三个参数的概念是不同的**，分属于受控系统模型和 PID 控制器参数。它们要通过某种算法来转换成 PID 控制参数（兼容机中使用所谓的 ITAE 最优参数整定法）。用户有兴趣的话，还是要看过程控制方面的书籍。所以，**在调节兼容参数时，常见的 PID 控制口诀是不适合的**。对于更换兼容机型的应用，由于内部参数转换算法可能存在不同，所以其参数有必要重新整定。

对于蒸发状态不太稳定的材料，可适当调低 PID 参数的灵敏程度，避免蒸发功率的跳变带来进一步的速率不稳定。

PID 参数，P 值越大，调节越快；Ti 值越大，调节越慢；Td 值越大，调节越快。



(a) 速率过冲大，减小 P。若仍过冲，减小 I，增强积分作用。

(b) 偏差明显，减小 I，增强积分作用。

(c) 起动时间长，增大 P，减小 I，增强积分作用。

(d) 振荡，增大 I，减弱积分作用。若仍振荡，增大 P。

6.8 晶控厚度控制

膜层厚度是光学薄膜光谱特性的重要参数，监控显示的厚度与样品片实际的厚度之间总是存在差异。晶控仪标称的厚度灵敏度可以做到非常高，甚至达到 0.005Å，但整体的膜厚控制相对准确度却要低得多。厚度灵敏度实际上是晶控仪的频率灵敏度的换算值，整体膜厚控制准确度却要相对于样品片来说。

晶控毕竟是一种间接监控，必然存在间接监控的缺点，如无法检测比例系数 (Tooling Factor) 变化等不利因素。其次，晶控探头在工作时需要水冷，以维持其温度稳定；而样品片却通常需要加温，二者成膜的真实情况会不同，特别是沉积特性及温度敏感材料。再次，成膜初始时刻的晶振片温度变化也会带来不小的偏差。最后，晶控由于不能检测光学厚度，不存在光控中窄带滤光片所谓的厚度补偿效应。而高精度光学成膜往往是以可镀制窄带滤光片为代表，这一点也成为晶控尚不能取代光控的最大理由。

这几种因素决定了现行的晶控膜厚控制准确度不会太高，当今通用晶控仪的控制准确度约为 0.5%。

XDM 晶控仪额外提供了一种膜厚相关的方法，可进一步提高厚度准确度。这是一种经过实践检验并已在申请发明专利的一种方法，参见 6.11。

6.9 控制延迟

所谓控制延迟阶段，是在源挡板打开后的一段时间，保持源功率不变，不进行速率控制。等延迟时间达到后，再开始速率控制。这样做的目的是为了避开源挡板打开初始效应，防止出现功率过冲。

源挡板刚打开时，晶振片表面由于蒸发源热辐射、材料的附着 (释放热) 而可能存在的温度上升，因为频率温度效应，温度上升会带来晶振片频率上升，这个频率上升会抵消部分由于材料附着而引起的频率下降，甚至会出现整体频率上升。而晶控仪不能分辨频率变化的来源，这也是为什么刚打开挡板时，有些材料工艺会出现负速率的原因之一。如果此时晶控仪立即启动 PID 调节功率，由于速率不准确，可能会带来很大功率超调，从而导致材料喷溅、分布变差等副作用。这个初始效应或有几秒钟甚至更长时间，需要用户根据实际材料和工艺进行摸索。

尽管通过调整 PID 参数可以减少初始功率超调，但同时会影响正常速率控制作用，增加了调整困难。所以本仪器提供了此控制延迟功能。除此之外，XDM 还在操作页面提供了快速更改最大功率上限的功能。

XDM 的控制延迟与某些机型的挡板延迟有区别。某些机型挡板延迟的用法，是将晶振片探头放在源挡板与源之间(无论源挡板是否打开，探头都能接受到蒸发，探头自带有挡板)，在限定的延迟时间内，将蒸发速率稳定在一定范围之内后再开挡板。

将挡板打开前的保持功率设定在正常成膜速率所需功率附近，加以一定控制延迟，或可达到较好的控制及成膜效果。

6.10 最大功率延迟

如 3.2.3 节所述，<最大功率延迟时间>，是指进入成膜状态后，允许蒸发源输出的最大功率，从保持功率线性的升到<材料>中设定的最大功率所需要的时间。用户可根据自身工艺，与<控制延迟>一起，适当设定可有效防止成膜初始阶段的速率过冲！

在常用的将晶控探头放置在挡板上方的控制方式下，晶控仪缺乏在预熔阶段对束流的调整手段，依赖于用户预先设定的预熔各阶段的功率设置(晶控探头在挡板下方的方式不在讨论之列)。

如上一小节中所述，<控制延迟>可在一定程度上减少挡板打开初期的热冲击对速率控制的影响，但它暗含一个前提是，最后的保持功率接近设定速率下的正常蒸发功率。但这个前提经常不容易得到保证。例如，材料的预熔情况、材料的高低、坩埚的冷却等都会对这个所谓的正常蒸发功率有所影响。这使得挡板打开瞬间，真正的材料速率并不总是一样。

一方面，希望控制延迟时间长一点，以等到挡板打开初期的热冲击效应消退后再调节速率，能减少速率过冲。但另一方面，控制延迟也不宜太长，因为此时的速率往往偏离设定速率；在非设定速率下成膜太长时间，恐带来分布变差等不利影响。

所以，为了尽快达到真实的设定速率，也不会有很大过冲。本晶控仪开发了一种在控制延迟结束后一定时间内限制最大功率幅度的功能。该功能定义为：从<控制延迟>结束时，输出允许的最大功率从最后一个<保持功率>按材料<最大功率延迟时间>线性的上升到材料中设定的最大功率。

实践证明，该功能与<控制延迟>结合使用后，可实现较短的真实速率建立时间，而且功率过调很小，满足高精度成膜需要。

速率建立的时间并不是越短越好！因为挡板打开初期，由于夹杂着热冲击等效应，晶控仪探测到的速率通常低于真实材料沉积速率。于是，尽管显示的速率达到并似乎稳定在设定速率附近，但真实材料沉积速率在初期可能数倍于材料设定速率！这一点从初期功率输出上可以看得出：在达到设定速率后功率往往有较大回落，而在此同时，显示的速率却似乎是稳定的。

允许的最大功率与成膜输出功率不是一个概念。**PID 控制过程计算得到的结果功率**

值，可能会超过允许的最大功率，但实际输出功率会受到当前允许的最大功率限制！在挡板打开初期，最大功率延迟时间内，尽管允许的最大功率仍在持续上升直至材料设定的最大功率，但是实际输出的功率仍将根据 PID 结果进行调节，并受到当前允许最大功率的限制。

6.11 如何指定运行(开始)膜系

如果 <配置参数>中指定了<计算机控制>方式，则不能在晶控仪中指定运行膜系。

以下描述针对<膜厚控制器>方式。

如果 输入端口中没有配置膜系位，则当前运行膜系由<运行参数>界面指定。如果输入端口中配置了 膜系位，并且所有膜系位都不有效，则当前运行膜系仍由<运行参数>界面指定。

如果输入端口中配置了 膜系位，而且至少有一位膜系位有效，则由输入位对应的二进制编码指定膜系。<运行参数>界面可查看到当前指定膜系号，但再不能更改。

勾选<运行参数>|<成膜记录数据>，每次开机时，如果没有膜系位输入端口，或不有效，则运行膜系是上次镀膜停止时的膜系号。而如果没有勾选，则开始膜系仅在上次是成膜过程中停电（强迫记录）中的膜系号，否则为默认值 1。

6.12 如何只用于监测速率和厚度

监控仪只监测速率和厚度，而不进行速率和厚度控制，是晶控仪早期的一种应用方式，至今仍有不少用户这样使用。

XDM 系列晶控仪中，在非成膜状态下不进行速率显示和厚度累积。要达到只监测速率和厚度的要求，应该至少建立一个材料和一个膜系。

对于材料而言，最重要的是密度参数。为了让晶控仪尽快查看速率和厚度累积，可将材料中的预熔阶段时间均设置为 0。这样，一旦<开始>或<继续>时，将立即进入成膜阶段。

对于膜系，应包含一层前述材料，该层厚度可设置为很大，例如 999KA，使得晶控仪在正常情况下不会累积到该厚度而自动停止。

运行该膜系即可。

对于第二次成膜，要先进行厚度清 0。可以在停止后，此时<开始>按键变为<继续>，再按<下一层>，变回到<开始>按键。而如果在<继续>状态下镀膜，则厚度会在原有基础上进行累积。

厚度清 0 的另一个方法是，在<运行参数>界面，将<起始厚度>改为 0。

如果有外接<厚度清 0>输入端口，则也可由外部进行厚度清 0。

如果接上位机，也可以发送 厚度清 0 命令。

如果用户的机器已经用到控制功能，而仅在某层或某种材料下进行速率和厚度监测且不控制。则可以将该材料蒸发源设置到不常用的端口，如 3，重复以上动作。

跟我们联系。

6.13 可选功能

XDM 提供了一个频率变化与厚度关系的在线计算小工具，为用户研究频率厚度关系提供方便。XDM 还提供了某种厚度相关的创新性功能（该方法正在申请国内发明专利中），可进一步提高厚度准确性，特别是极薄层的精准性。

这些可选功能需要另收费，请有此需要的用户与本公司联系。

6.14 为什么有时镀膜机打到自动时，坩埚会自己跑到 1 号位

这通常发生在坩埚二进制驱动方式下。如果晶控仪开机后没有执行过坩埚转位命令（包括成膜），则晶控仪的所有坩埚驱动继电器处于释放状态（断开）。因为此时全断开，对应的坩埚位置是 1。所以当镀膜机打到自动时，将接收晶控仪坩埚位置指令信息，就会转动坩埚到 1 号位。

当成膜开始时，晶控仪会自动发出坩埚位指令并等待坩埚到位后才进行预熔等动作。所以，只要膜系中坩埚号设定正确，就不用担心此问题了。

另外，XDM 提供试用，用户可在本公司或代理商处得到更详细的说明。

附录 A 常见材料 Z-ratio, Density 表

<材料>界面中，可通过<材料速查>查到大部分以下材料参数。

Formula	Density	Z-ratio	Material Name
Ag	10.500	0.529	Silver
AgBr	6.470	1.180	Silver Bromide
AgCl	5.560	1.320	Silver Chloride
Al	2.700	1.080	Aluminum
Al ₂ O ₃	3.970	0.336	Aluminum Oxide
Al ₄ C ₃	2.360	*1.000	Aluminum Carbide
AlF ₃	3.070	*1.000	Aluminum Fluoride
AlN	3.260	*1.000	Aluminum Nitride
AlSb	4.360	0.743	Aluminum Antimonide
As	5.730	0.966	Arsenic
As ₂ Se ₃	4.750	*1.000	Arsenic Selenide
Au	19.300	0.381	Gold
B	2.370	0.389	Boron
B ₂ O ₃	1.820	*1.000	Boron Oxide
B ₄ C	2.370	*1.000	Boron Carbide
Ba	3.500	2.100	Barium
BaF ₂	4.886	0.793	Barium Fluoride
Ba(NO ₃) ₂	3.244	1.261	Barium Nitrate
BaO	5.720	*1.000	Barium Oxide
BaTiO ₃	5.999	0.464	Barium Titanate (Tetr)
BaTiO ₃	6.035	0.412	Barium Titanate (Cubic)
Be	1.850	0.543	Beryllium
BeF ₂	1.990	*1.000	Beryllium Fluoride
BeO	3.010	*1.000	Beryllium Oxide
Bi	9.800	0.790	Bismuth
Bi ₂ O ₃	8.900	*1.000	Bismuth Oxide
Bi ₂ S ₃	7.390	*1.000	Bismuth Trisulphide
Bi ₂ Se ₃	6.820	*1.000	Bismuth Selenide
Bi ₂ Te ₃	7.700	*1.000	Bismuth Telluride
BiF ₃	5.320	*1.000	Bismuth Fluoride
BN	1.860	*1.000	Boron Nitride
C	2.250	3.260	Carbon (Graphite)

C	3.520	0.220	Carbon (Diamond)
GaN	6.100	*1.000	Gallium Nitride
GaP	4.100	*1.000	Gallium Phosphide
GaSb	5.600	*1.000	Gallium Antimonide
Gd	7.890	0.670	Gadolinium
Gd2O3	7.410	*1.000	Gadolinium Oxide
Ge	5.350	0.516	Germanium
Ge3N2	5.200	*1.000	Germanium Nitride
GeO2	6.240	*1.000	Germanium Oxide
GeTe	6.200	*1.000	Germanium Telluride
Hf	13.090	0.360	Hafnium
HfB2	10.500	*1.000	Hafnium Boride
HfC	12.200	*1.000	Hafnium Carbide
HfN	13.800	*1.000	Hafnium Nitride
HfO2	9.680	*1.000	Hafnium Oxide
HfSi2	7.200	*1.000	Hafnium Silicide
Hg	13.460	0.740	Mercury
Ho	8.800	0.580	Holmium
Ho2O3	8.410	*1.000	Holmium Oxide
In	7.300	0.841	Indium
In2O3	7.180	*1.000	Indium Sesquioxide
In2Se3	5.700	*1.000	Indium Selenide
In2Te3	5.800	*1.000	Indium Telluride
InAs	5.700	*1.000	Indium Arsenide
InP	4.800	*1.000	Indium Phosphide
InSb	5.760	0.769	Indium Antimonide
Ir	22.400	0.129	Iridium
K	0.860	10.189	Potassium
KBr	2.750	1.893	Potassium Bromide
KCl	1.980	2.050	Potassium Chloride
KF	2.480	*1.000	Potassium Fluoride
KI	3.128	2.077	Potassium Iodide
La	6.170	0.920	Lanthanum
La2O3	6.510	*1.000	Lanthanum Oxide
LaB6	2.610	*1.000	Lanthanum Boride
LaF3	5.940	*1.000	Lanthanum Fluoride

LaN5	8.770	0.360	Lanthanum Nickel
Li	0.530	5.900	Lithium
LiBr	3.470	1.230	Lithium Bromide
LiF	2.638	0.778	Lithium Fluoride
LiNbO3	4.700	0.463	Lithium Nlobate
Lu	9.840	*1,000	Lutetium
Mg	1.740	1.610	Magnesium
MgAl2O4	3.600	*1.000	Magnesium Aluminate
MgF2	3.180	0.637	Magnesium Fluoride
MgO	3.580	0.411	Magnesium Oxide
MgO3Al2O3	8.000	*1.000	Spinel
Mn	7.200	0.377	Manganese
MnO	5.390	0,467	Manganese Oxide
MnS	3.990	0.940	Manganese (II) Sulfide
Mo	10.200	0.257	Molybdenum
Mo2C	9.180	*1.000	Molybdenum Carbide
MoB2	7.120	*1.000	Molybdenum Boride
MoO3	4.700	*1.000	Molybdenum Trioxide
MoS2	4.800	*1.000	Molybdenum Disulfide
Na	0.970	4.800	Sodium
Na3AlF6	2.900	*1.000	Cryolite
Na5Al3F14	2.900	*1.000	Chiolite
NaBr	3.200	*1.000	Sodium Bromide
NaCl	2.170	1.570	Sodium Chloride
NaClO3	2.164	1.565	Sodium Chlorate
NaF	2.558	0.949	Sodium Fluoride
NaN03	2.270	1.194	Sodium Nitrate
Nb	8.578	0.492	Niobium (Columbium)
Nb2O3	7.500	*1.000	Niobium Trioxide
Nb2O5	4.470	*1.000	Niobium (V) Oxide
NbB2	6.970	*1.000	Niobium Boride
NbC	7.820	*1.000	Niobium Carbide
NbN	8.400	*1,000	Niobium Nitride
Nd	7.000	*1.000	Neodymium
Nd2O3	7.240	*1.000	Neodymium Oxide
NdF3	6.506	*1.000	Neodymium Fluoride

Ni	8.910	0.331	Nickel
NiCr	8.500	*1.000	Nichrome
NiCrFe	8.500	*1.000	Inconel
NiFe	8.700	*1.000	Permalloy
NiFeMo	8.900	*1.000	Supermalloy
NiO	7.450	*1.000	Nickel Oxide
P3N5	2.510	*1.000	Phosphorus Nitride
Pb	11.300	1.130	Lead
PbCl2	5.850	*1.000	Lead Chloride
PbF2	8.240	0.661	Lead Fluoride
PbO	9.530	*1.000	Lead Oxide
PbS	7.500	0.566	Lead Sulfide
PbSe	8.100	*1.000	Lead Selenide
PbSnO3	8.100	*1.000	Lead Stannate
PbTe	8.160	0.651	Lead Telluride
Pb2TiO3	7.500	1.160	Lead Titanate
Pd	12.038	0.357	Palladium
PdO	8.310	*1.000	Palladium Oxide
Po	9.400	*1.000	Polonium
Pr	6.780	*1.000	Praseodymium
Pr2O3	6.880	*1.000	Praseodymium Oxide
Pt	21.400	0.245	Platinum
PtO2	10.200	*1.000	Platinum Oxide
Ra	5.000	*1.000	Radium
Rb	1.530	2.540	Rubidium
RbI	3.550	*1.000	Rubidium Iodide
Re	21.040	0.150	Rhenium
Rh	12.410	0.210	Rhodium
Ru	12.362	0.182	Ruthenium
S8	2.070	2.290	Sulphur
Sb	6.620	0.768	Antimony
Sb2O3	5.200	*1.000	Antimony Trioxide
Sb2S3	4.640	*1.000	Antimony Trisulfide
Sc	3.000	0.910	Scandium
Sc2O3	3.860	*1.000	Scandium Oxide
Se	4.810	0.864	Selenium

Si	2.320	0.712	Silicon
Si ₃ N ₄	3.440	*1.000	Silicon Nitride
SiC	3.220	*1.000	Silicon Carbide
SiO	2.130	0.870	Silicon (II) Oxide
SiO ₂	2.648	1.000	Silicon Dioxide
Sm	7.540	0.890	Samarium
Sm ₂ O ₃	7.430	*1.000	Samarium Oxide
Sn	7.300	0.724	Tin
SnO ₂	6.950	*1.000	Tin Oxide
SnS	5.080	*1.000	Tin Sulfide
SnSe	6.180	*1.000	Tin Selenide
SnTe	6.440	*1.000	Tin Telluride
Sr	2.600	*1.000	Strontium
SrF ₂	4.277	0.727	Strontium Fluoride
SrTiO ₃	5.123	0.310	Strontium Titanate
SrO	4.990	0.517	Strontium Oxide
Ta	16.600	0.262	Tantalum
Ta ₂ O ₅	8.200	0.300	Tantalum (V) Oxide
TaB ₂	11.150	*1.000	Tantalum Boride
TaC	13.900	*1.000	Tantalum Carbide
TaN	16.300	*1.000	Tantalum Nitride
Tb	8.270	0.660	Terbium
Tc	11.500	*1.000	Technetium
Te	6.250	0.900	Tellurium
TeO ₂	5.990	0.862	Tellurium Oxide
Th	11.694	0.484	Thorium
ThF ₄	6.320	*1.000	Thorium (IV) Fluoride
ThO ₂	9.860	0.284	Thorium Dioxide
ThOF ₂	9.100	*1.000	Thorium Oxyfluoride
Ti	4.500	0.628	Titanium
Ti ₂ O ₃	4.600	*1.000	Titanium Sesquioxide
TiB ₂	4.500	*1.000	Titanium Boride
TiC	4.930	*1.000	Titanium Carbide
TiN	5.430	*1.000	Titanium Nitride
TiO	4.900	*1.000	Titanium Oxide
TiO ₂	4.260	0.400	Titanium (IV) Oxide

TI	11.850	1.550	Thallium
TIBr	7.560	*1.000	Thallium Bromide
TICl	7.000	*1.000	Thallium Chloride
TII	7.090	*1.000	Thallium Iodide (B)
U	19.050	0.238	Uranium
U409	10.969	0.348	Uranium Oxide
UO2	10.970	0.286	Uranium Dioxide
U308	8.300	*1.000	Tri Uranium Octoxide
V	5.960	0.530	Vanadium
V205	3.360	*1.000	Vanadium Pentoxide
VB2	5.100	*1.000	Vanadium Boride
VC	5.770	*1.000	Vanadium Carbide
VN	6.130	*1.000	Vanadium Nitride
VO2	4.340	*1.000	Vanadium Dioxide
W	19.300	0.163	Tungsten
WC	15.600	0.151	Tungsten Carbide
WB2	10.770	*1.000	Tungsten Boride
WO3	7.160	*1.000	Tungsten Trioxide
WS2	7.500	*1.000	Tungsten Disulphide
WSi2	9.400	*1.000	Tungsten Silicide
Y	4.340	0.835	Yttrium
Y203	5.010	*1.000	Yttrium Oxide
Yb	6.980	1.130	Ytterbium
Yb203	9.170	*1.000	Ytterbium Oxide
Zn	7.040	0.514	Zinc
Zn3Sb2	6.300	*1.000	Zinc Antimonide
ZnF2	4.950	*1.000	Zinc Fluoride
ZnO	5.610	0.556	Zinc Oxide
ZnS	4.090	0.775	Zinc Sulfide
ZnSe	5.260	0.722	Zinc Selenide
ZnTe	6.340	0.770	Zinc Telluride
Zr	6.490	0.600	Zirconium
ZrB2	6.080	*1.000	Zirconium Boride
ZrC	6.730	0.264	Zirconium Carbide
ZrN	7.090	*1.000	Zirconium Nitride
ZrO2	5.600	*1.000	Zirconium Oxide

