

# P2

## 热膨胀（Thermal Expansion）

### 定义（Definition）

1. 体积变化：
  - 几何尺寸的变化：随温度变化而导致物体几何尺寸的改变。
  - 能量吸收和膨胀：一般来说，温度增加会使物体膨胀，反之则会收缩。
  - 密度变化：几何尺寸的变化会影响物体的密度。

### 宏观应用（Macroscopic Applications）

1. 双金属开关（**Bi-metal Switches**）：
  - 利用两种不同金属对温度变化的不同膨胀率进行控制。
2. 温度计和恒温器（**Thermometer and Thermostat**）：
  - 利用物质膨胀特性测量和调节温度。
3. 斯特林发动机（**Stirling Engine**）：
  - 利用温差引起的气体热膨胀和冷却收缩来驱动活塞运动。
  - 幻灯片右下角的图示为斯特林发动机模型。
4. 内燃机（**Combustion Engine**）：
  - 利用燃烧产生的热膨胀气体驱动活塞运动做功。
5. 热气球（**Hot-Air Balloon**）：
  - 加热气体导致热气球内的空气膨胀，使密度降低，从而升空。
  - 幻灯片右侧的图示包含一只热气球。

### 应用图示

- 温度计：图中展示了一种传统的液体温度计，通过温度变化引起液体膨胀或收缩以读取温度。
- 热气球：利用热空气的膨胀将热气球升空。
- 斯特林发动机模型：展示其利用温差进行机械运动的应用。

### 结论

- 热膨胀是一个由于温度变化导致物体几何尺寸变化的现象，这种变化进一步影响物体的密度。
- 热膨胀现象在许多日常和工业应用中都有广泛的利用，从简易的温度计到复杂的发动机系统，热膨胀的应用展示了其在温度测量、自动控制和机械动力等领域中的重要性。

通过理解和利用热膨胀现象，可以设计和实现许多高效、精确的控制系统和机械装置。

## P3

### 微致动器（Microactuator）

微致动器（Microactuator）的原理和类型，特别关注热膨胀和相变的应用。

#### 热膨胀（Thermal Expansion）：

1. 各向同性线性膨胀致动器（**Isotropic Linear Expansion Actuator**）：
  - 固体梁的线性膨胀（**Linear Expansion of a Solid Beam**）：当温度增加时，固体梁会沿其长度方向膨胀。
  - 通过设计变化实现弯曲致动（**Bending Actuation by Design Variations**）：通过设计的不同，使固体梁在热膨胀时实现弯曲动作。右上角图片展示了梁在温度变化下的弯曲仿真。
2. 双金属致动器（**Bi-metal Actuator**）：
  - 不同的热膨胀系数（**Different Thermal Expansion Coefficients**）：利用两种具有不同热膨胀系数的金属，使得复合结构在温度变化时发生弯曲，常用于温控开关等应用。
3. 气体膨胀致动器（**Gas Expansion Actuator**）：
  - 行为符合理想气体定律（**Behaviour According to the Ideal Gas Law**）：利用温度变化引起气体体积的膨胀或收缩来驱动致动器工作。中下部的结构图示展示了热膨胀致动器的设计。

#### 相变（Phase Transformation）：

1. 蒸发致动器：液体 $\Leftrightarrow$ 气体（**Evaporation Actuator: Liquid  $\Leftrightarrow$  Gas**）：
  - 利用液体蒸发和气体冷凝的相变过程来实现致动。
2. 形状记忆致动器：奥氏体 $\Leftrightarrow$ 马氏体（**Shape Memory Actuator: Austenite  $\Leftrightarrow$  Martensite**）：
  - 利用形状记忆合金材料，在奥氏体和马氏体相之间的转变过程中，材料会记忆并恢复预设的形状，从而实现致动。右下角图片展示了形状记忆合金在相变过程中的形态变化。

#### 图示说明：

- 上方彩色图片：展示了梁在温度变化下的弯曲仿真，颜色变化代表梁的不同温度分布和应力分布。
- 中部结构图：展示了一种由硅片、加热器、热敏电阻和玻璃片组成的热膨胀致动器的剖面图，展示了其各个组件。
- 下方蓝色图片：展示了形状记忆合金在不同相态转换中的形状变化过程，通过实现不同形状的恢复和变化来实现致动。

## 结论：

- 热膨胀和相变原理在微致动器设计中起到了关键作用，通过操控温度和相变，可以实现多种形式的机械运动。
- 不同的材料和设计可以实现各种复杂的致动行为，满足不同应用场景的需求。

通过这些技术，我们可以设计高效而精确的微机械系统，在微电子、精密仪器和智能材料等领域中有广泛的应用前景。

## P5

### 为什么会发生热膨胀（Thermal Expansion）

这张幻灯片讨论了为什么会发生热膨胀（Thermal Expansion），并解释了其中涉及的原子间距离（Interatomic Distance）。

#### 原子间距离（Interatomic Distance）：

1. 吸引力（**Attractive Forces**）：
  - 固体内的原子通过吸引力连接在一起，使原子保持在一起。
2. 排斥力（**Repulsive Forces**）：
  - 存在一种排斥力来定义原子之间的间距，这种排斥力会随着原子靠近而增加。
3. 平衡距离（**Equilibrium Distance**） $r_0$ ：
  - 原子间距离  $r_0$  是由吸引力和排斥力达到平衡的位置决定的。在这个位置上，净力为零，即吸引力和排斥力大小相等，方向相反。

#### 图表解释（右侧）：

1. 横轴（**X-Axis**）：原子间距（Interatomic Separation,  $r$ ）。
2. 纵轴（**Y-Axis**）：力（Force,  $F$ ）。
3. 吸引力曲线（**Attractive Force,  $F_A$** ）：
  - 吸引力随着原子间距离增加而减小。
4. 排斥力曲线（**Repulsive Force,  $F_R$** ）：
  - 排斥力随着原子间距离的减小而急剧增加。
5. 净力曲线（**Net Force,  $F_N$** ）：
  - 净力为吸引力和排斥力的合力。当净力为零时，即  $r_0$  位置，系统处于稳定状态。

## 结论:

- 在热膨胀过程中, 温度的增加会使原子获得更多的动能, 从而使原子间的平均距离增大。
- 当温度升高时, 这种平衡被打破, 原子间距  $r_0$  增加, 导致物体整体尺寸的增加。这就是为什么温度升高会引起热膨胀。
- 了解原子间距离的变化和作用力的平衡机制, 可以有效解释热膨胀的本质, 也为材料和结构在温度变化下的行为预测提供了理论基础。

通过这张幻灯片, 清晰地理解了热膨胀的微观机制, 为进一步研究和应用材料的热膨胀特性提供了科学依据。

## P6

### 为什么会有热膨胀?

#### 振动 (Oscillation):

- 在  $T = 0 \text{ K}$  时, 原子是固定的, 而在  $T > 0 \text{ K}$  时, 原子会振动 (oscillate)。
- 如果是谐振动 (harmonic oscillation) (抛物线型势能 (parabolic linkage potential)), 物体将不会表现出热膨胀 (thermal expansion)。
- 吸引力 (attractive forces) 的作用范围比排斥力 (repulsive forces) 更大。
  - 这导致了不对称的势能曲线 (asymmetric potential curve)。
  - 粒子能量 (particle energy) 的增加 ( $W_0 < W_1 < W_2$ ) 使得平均原子间距 (average interatomic distance) 增加。

#### 图示解释

- 图中展示了势能曲线 (potential curve), 其中  $W_{\text{harm}}$  表示谐振动的势能,  $W_{\text{anharm}}$  表示非谐振动的势能。
- 随着温度  $T$  的增加, 粒子能量  $W$  增加, 导致平均原子间距  $r_0(T)$  增加, 从而引起热膨胀。

通过这些解释, 我们可以理解为什么材料在温度升高时会发生热膨胀。

# P7

## 公式 (Formulae)

### 体积膨胀 (Volume Dilatation):

- 体积膨胀系数 (Volume Dilatation Coefficient)  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{1}{V_0} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p$$

其中,  $V_0$  是初始体积,  $T$  是温度,  $p$  是压力。

- 对于小温度范围 (Small Temperature Ranges):

$$\bar{\gamma} = \frac{\Delta V / V_0}{\Delta T}$$

其中,

$$\Delta V = V - V_0 \quad \text{和} \quad \Delta T = T - T_0$$

### 线性膨胀 (Linear Expansion):

- 线性膨胀系数 (Linear Expansion Coefficient)  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{1}{L_0} \left( \frac{\partial L}{\partial T} \right)_p$$

其中,  $L_0$  是初始长度,  $T$  是温度,  $p$  是压力。

- 对于各向同性材料 (Isotropic Materials):

$$\gamma = 3 \cdot \alpha$$

- 对于小温度范围 (Small Temperature Ranges):

$$\bar{\alpha} = \frac{\Delta L / L_0}{\Delta T}$$

其中,

$$\Delta L = L - L_0 \quad \text{和} \quad \Delta T = T - T_0$$

## 关键变量 (Key Variables):

- $T$ : 温度 (Temperature)
- $V$ : 体积 (Volume)
- $L$ : 长度 (Length)
- $\gamma$ : 体积膨胀系数 (Volume Dilatation Coefficient)
- $\alpha$ : 线性膨胀系数 (Linear Expansion Coefficient)
- $p$ : 压力 (Pressure)

这些公式描述了材料在温度变化时的体积和线性膨胀行为。通过这些公式，可以计算出材料在不同温度下的膨胀量。

## P9

## 导管尖端定位系统 (Positioning System for Catheter Tips)

### 背景 (Background):

- 系统用于在血管内定位**激光束 (laser beam)**。
- 对于治疗干预 (**therapeutic interventions**)，需要精确且可靠地定位能量，以避免损害健康组织 (healthy tissue)。

### 设置和参数 (Setup and Parameters):

- 3个**气囊 (balloons)** 用于导管倾斜驱动和固定 (catheter tilt actuation and fixation)。
- 3个**电-热-气动阀 (electro-thermo-pneumatically valves)** 用于控制气囊 (controlling of the balloons)。
- **小孔 (orifices)** 既作为流动阻力 (flow resistances)，又作为溢流口 (overflow)，以在流量减少时减小气囊的直径 (balloon's diameter)。

### 图示解释

- 图中展示了导管尖端定位系统的结构，包括**激光 (laser)**、**气囊 (balloons)**、**导管软管 (catheter hose)** 和**微阀系统 (microvalve system)**。
- 该系统通过控制气囊的充气和放气，实现导管尖端的精确定位。

通过这些设置和参数，可以实现导管尖端在血管内的精确定位，从而提高治疗干预的效果和安全性。

# P10

## 导管尖端定位系统 (Positioning System for Catheter Tips)

### 左图 (Left Image):

- 定位系统 (Positioning System) 安装在短导管轴 (short catheter shaft) 上，带有用于电气、光学和流体连接的近端适配器 (proximal adaptor)。

### 右图 (Right Image):

- 总长度 (Overall length): 11 毫米 (mm)
- 最小直径 (Min. diameter): 2.5 毫米 (mm)
- 最大直径 (Max. diameter) (充气后 (inflated)) : 4 毫米 (mm)
- 所需压差 (Required differential pressure): 100 - 200 百帕 (hPa) (0.1 - 0.2 巴 (bar))
- 操作范围 (Operational range): 3 - 3.5 毫米 (mm)

### 说明:

- 该系统通过在短导管轴上安装定位系统，并使用近端适配器进行电气、光学和流体连接，实现导管尖端的精确定位。
- 右图展示了充气后的导管尖端，显示了其操作范围和所需的压差。

通过这些参数和设置，可以确保导管尖端在血管内的精确定位，从而提高治疗干预的效果和安全性。

# P11

## 主动阀系统 (Active Valve System)

### 类型 (Type):

- 常开阀 (Normally-open valve)

### 驱动方式 (Actuation):

- 电-热-气动 (Electro-thermo-pneumatic)

## 尺寸 (Dimensions):

- 直径 (**Diameter**): 2.5 毫米 (mm)
- 高度 (**Height**): 1 毫米 (mm)
- 塑料外壳 (**Plastic casing**)

## 结构说明 (Structure Explanation):

- 膜片 (**Membrane**): 控制阀门的开关状态。
- 对准销 (**Alignment pins**): 确保组件的正确对齐。
- 电气连接 (**Electrical connection**): 提供电力以驱动电阻加热器 (Resistive heater)。
- 流动元件 (**Flow element**): 控制流体的流动。
- 执行元件 (**Actuator elements**): 驱动膜片的运动。
- 钢管 (**Steel pipe**): 提供结构支持。
- 粘合剂 (**Adhesive**): 固定组件。
- 入口 (**Inlet**): 从导管 (Catheter) 进入的流体。
- 出口 (**Outlet**): 流体流向定位气囊 (Positioning balloons)。

## 工作原理 (Working Principle):

- 当电阻加热器 (Resistive heater) 加热时，膜片 (Membrane) 会发生形变，改变阀门的开关状态，从而控制流体的流动。
- 该系统通过电-热-气动方式驱动，确保流体能够精确地流向定位气囊，实现导管尖端的精确定位。

通过这些组件和工作原理，主动阀系统能够在医疗操作中提供精确的流体控制，确保导管尖端的准确定位。

## P12

## 所有微部件的组装策略 (Set-up of All Microparts-Assembly Strategy)

### 组件说明 (Components Description):

1. 溢流出口 (**Overflow Outlet**)
2. 气囊连接 II (**Balloon Connection II**)
3. 钢管 (**Steel Pipe**)
4. 气囊连接 (**Balloon Connection**)
5. 流体板 (**Fluid Platelet**)



6. 聚酰亚胺 (Polyimide)
7. 执行器板 II (Actuator Platelet II)
8. 电阻加热器 (Resistive Heaters)
9. 执行器板 I (Actuator Platelet I)
10. 轴 (Shaft)
11. 带有光纤和电线的导管轴 (Catheter Shaft with Optical Fibre and Wires)

## 组装策略 (Assembly Strategy):

- 气囊子系统 (Balloon Subsystem):
  - 包括溢流出口、气囊连接 II、钢管和气囊连接。
- 微阀系统 (Microvalve System):
  - 直径为 2.5 毫米，包含流体板、聚酰亚胺、执行器板 II、电阻加热器、执行器板 I 和轴。

## 右图 (Right Image):

- 展示了模制的微部件和气囊 (Molded Microparts and Balloons)。

## 组装过程 (Assembly Process):

1. 将溢流出口、气囊连接 II 和钢管组装在一起，形成气囊子系统的上部。
2. 将气囊连接、流体板和聚酰亚胺依次组装在钢管上。
3. 将执行器板 II、电阻加热器和执行器板 I 组装在聚酰亚胺上。
4. 将轴插入到组装好的组件中，确保所有部件对齐。
5. 将带有光纤和电线的导管轴连接到组装好的组件上，完成整个系统的组装。

通过这些步骤，可以将所有微部件精确地组装在一起，形成完整的导管尖端定位系统。

# P13

## 主动阀系统的微组件 (Microcomponents of Active Valve System)

## 左图 (Left Image):

- 模制功能板 (Molded Functional Platelets):
  - 材料：聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA)
  - 直径：2.5 毫米 (mm)
  - 制造技术：先进的 LIGA 技术 (Advanced LIGA Technique)

## 中图 (Middle Image):

- 结构化膜片 (Structured Membrane):
  - 厚度: 1.4 微米 ( $\mu\text{m}$ )
  - 制造技术: 光刻 (Optical Lithography)
  - 材料: 聚酰亚胺 (Polyimide)

## 右图 (Right Image):

- 电阻加热器 (Resistive Heater):
  - 厚度: 1 微米 ( $\mu\text{m}$ )
  - 制造技术: 光刻和电镀金属 (Optical Lithography & Electroplated Metal)

## 说明:

- 这些微组件是主动阀系统的重要组成部分，通过精密制造技术，如 LIGA 技术和光刻技术，确保了组件的高精度和高性能。
- 模制功能板用于实现阀门的基本功能，结构化膜片用于控制流体的流动，电阻加热器用于驱动膜片的运动。

通过这些高精度的微组件，主动阀系统能够在医疗操作中提供精确的流体控制，确保导管尖端的准确定位。

# P14

## 主动阀系统的微组件 (Microcomponents of Active Valve System)

### 气囊 (Balloons):

- 制造 (Manufacturing):
  - 气囊通过局部扩展聚氨酯管 (polyurethane tubes) 一体成型 (manufactured in one piece)。

### 组装 (Assembly):

- 对准销 (Alignment Pins):
  - 通过对准销进行组装 (Assembly by the alignment pins)。

### 固定 (Fixation):

- 毛细管粘合 (Capillary Gluing):

- 通过毛细管粘合进行固定 (Fixation by capillary gluing)。

## 右图 (Right Image):

- 展示了安装在导管上的气囊系统，显示了气囊的结构和固定方式。

## 说明:

- 气囊通过局部扩展聚氨酯管一体成型，确保了气囊的完整性和耐用性。
- 组装过程中使用对准销确保各组件的精确对齐。
- 固定过程中使用毛细管粘合技术，确保气囊在导管上的牢固固定。

通过这些制造和组装技术，主动阀系统能够在医疗操作中提供精确的流体控制，确保导管尖端的准确定位。

## P15

### 阀门测试 (Valve test)

1. 成功测试 (Successful test)：使用氮气 (nitrogen) 作为驱动流体 (driving fluid)。
2. 电功率消耗 (Electric power dissipated)：在一个单一的电阻加热器 (resistive heater) 中消耗电功率，以在给定的供给压力 (supply pressure) 下关闭阀门 (close the valve)。
3. 功率偏移 (Power offset)：在零压力 (zero pressure) 下的功率偏移是由于膜张力 (membrane tension) 引起的。

右侧的图表展示了有效功率 (eff. power) 与压差 (p\_diff) 之间的关系。图表显示，随着压差的增加，有效功率也在增加。

## P16

### 体外测试 (In-vitro tests)

1. 电功率输入 (Electric power input)：35毫瓦 (mW)
2. 供给压力 (Supply pressure)：150百帕 (hPa)
3. 流量 (Flow)：130微升每秒 ( $\mu\text{l/s}$ )
4. 测试管腔 (Test lumen)：直径3.5毫米 (mm) 的玻璃管 (glass tube)

5. 驱动流体 (Driving fluid) : 氮气 (nitrogen)
6. 偏转 (Deflection) : 最大5度 (max. 5°)
7. 横向移动 (Lateral movement) : 最大0.5毫米 (max. 0.5 mm), 两个方向 (2 directions)

右侧的图表展示了激光点 (laser spot) 的稳定位置 (stable position), 通过x轴和y轴的位移 (displacement) 来表示。

最后一行提到激光点的控制 (Steering of laser spot) 。

## P19

### 用于体内植入物的常闭阀 (normally closed valve for body implants)

用于体内植入物的常闭阀 (normally closed valve for body implants) 的目标和功能原理 (functional principle)

#### 目标 (Goal)

- 常闭阀 (Normally closed valve) : 用于体内植入物 (body implants) 。

#### 功能原理 (Functional principle)

- 预应力膜 (Pre-stressed membrane)

#### 详细解释

1. 双稳态膜 (Bistable membrane) : 这种膜具有两种稳定状态, 可以在这两种状态之间切换。
2. 工作流体 (Working fluid) : 在阀门内部流动的流体。
3. 珀尔帖热泵 (Peltier heat pump) : 用于加热或冷却工作流体, 从而改变膜的状态。

#### 工作原理

- 当压力增加 (pressure↑) 时, 输入热量 ( $Q_{in}$ ), 膜会向上弯曲, 关闭阀门。
- 当压力降低 (pressure↓) 时, 输出热量 ( $Q_{out}$ ), 膜会向下弯曲, 打开阀门。

#### 流程

1. 初始状态: 阀门处于关闭状态, 膜向上弯曲。
2. 加热: 通过珀尔帖热泵输入热量 ( $Q_{in}$ ), 增加工作流体的压力, 使膜保持向上弯曲状态。

3. 冷却：通过珀尔帖热泵输出热量（ $Q_{out}$ ），降低工作流体的压力，使膜向下弯曲，打开阀门。

绿色箭头表示流体的流动方向，红色箭头表示热量的输入和输出。

## P20

### 动机（Motivation）& 早期示例（Early examples）

#### 动机（Motivation）

##### 双稳态切换（Bistable switching）

- 能量有利（Energetic favourable）：在低切换频率（low switching frequencies）下能量消耗较低。
- 应用（Application）：在小型微阀（micro-valves）中，例如在主动植入物（active implants）中使用。

#### 早期示例（Early examples）

幻灯片右侧展示了两个早期的微阀设计示例：

##### 1. Wagner 1996:

- 阀座（Valve seat）
- 入口（Inlet）
- 硅膜（Silicon membrane）
- 电极（Electrodes）
- 出口（Outlet）
- 垫片（Pad）

##### 2. Goll 1998:

- 出口（Outlet）
- 入口（Inlet）
- 硅片（Silicone platelet）
- 聚酰亚胺膜（Polyimide diaphragm）
- 电阻加热器（Resistive heater）
- 孔口（Orifice）
- 流体腔（Fluid chamber）
- 执行器腔（Actuator chamber）

# 图示说明

- 左下角的图片展示了一个微型泵系统，包括：
  - 驱动电子设备（Driving Electronics）
  - 泵模块（Pumping Module）
  - 储液器（Reservoir）
  - 袖带假体（Cuff Prosthesis）
  - 遥测模块（Telemetric Module）

这些示例展示了双稳态切换在微型阀门和植入设备中的应用，强调了其在低能耗和小型化方面的优势。

## P21

### 双稳态预应力膜（Bistable pre-stressed membrane）

#### 结构和组件

- 距离传感器（Distance-sensor）：用于测量膜的位移。
- 压力控制器（Pressure controller）：用于调节膜两侧的压力差。
- 膜材料：2微米的二氧化硅（2  $\mu\text{m}$  SiO<sub>2</sub>）和10微米的硅（10  $\mu\text{m}$  Si）。

#### 仿真和测量

- 有限元仿真（FEM-simulation）：使用ANSYS软件进行仿真。
- 膜特性（测量值）（Membrane characteristic (measured)）：展示了膜在不同压力差下的位移特性。

#### 图表和数据

- 左下角的图表展示了压力差（Pressure difference）与位移（Displacement）之间的关系：
  - 蓝线（Simulation）：仿真结果
  - 红线（Messung）：测量结果
  - 横轴表示压力差（单位：kPa）
  - 纵轴表示位移（单位： $\mu\text{m}$ ）
- 右下角的表格展示了膜的特性数据：
  - 膜半径（r<sub>mem</sub>）：2.0毫米（mm）
  - 总压力差（ $\Delta p_{ges}$ ）：23.4千帕（kPa）
  - 总位移（ $\Delta z_{ges}$ ）：50.5微米（ $\mu\text{m}$ ）

## 解释

1. **结构**：膜由二氧化硅和硅组成，具有预应力特性。
2. **测量和仿真**：通过距离传感器和压力控制器测量膜的位移，并使用ANSYS进行仿真。
3. **结果**：图表展示了仿真和测量的结果，表格提供了膜的关键特性数据。

这张幻灯片详细展示了双稳态预应力膜的结构、测量方法和仿真结果，强调了其在不同压力差下的位移特性。

## P22

### 微阀（Micro-valve）

#### 组件和结构

1. **流体连接（Fluidic connection）**：用于连接流体的入口和出口。
2. **双稳态膜（Bistable membrane）**：具有两种稳定状态的膜，可以在这两种状态之间切换。
3. **工作流体（Working fluid）**：在阀门内部流动的流体。
4. **电连接（Electrical connection）**：用于连接电源和控制电路。
5. **微型珀尔帖元件（Micro Peltier element）**：用于加热或冷却工作流体，从而改变膜的状态。
6. **散热器（Heat sink）**：用于散热，保持系统的温度稳定。

#### 工作原理

- **流体流动**：流体通过流体连接进入阀门，并在双稳态膜的控制下流动。
- **膜的状态切换**：通过微型珀尔帖元件加热或冷却工作流体，改变膜的状态，从而控制阀门的开关。
- **电连接**：电连接用于提供电能给微型珀尔帖元件和控制电路。

#### 详细解释

1. **流体连接**：流体通过顶部的流体连接进入阀门，并在双稳态膜的控制下流动。
2. **双稳态膜**：膜可以在两种稳定状态之间切换，通过改变膜的形状来控制流体的流动。
3. **工作流体**：工作流体在膜的两侧流动，通过改变流体的温度来控制膜的状态。
4. **微型珀尔帖元件**：用于加热或冷却工作流体，从而改变膜的状态。珀尔帖元件通过电连接与外部电源相连。
5. **散热器**：用于散热，保持系统的温度稳定，确保微型珀尔帖元件的正常工作。

这张幻灯片详细展示了微阀的结构和工作原理，强调了双稳态膜和微型珀尔帖元件在控制流体流动中的关键作用。

## 制造步骤（Fabrication）

1. 硅片（Si-wafer）：
  - 使用带有2微米预应力二氧化硅（pre-stressed SiO<sub>2</sub>）的硅片。
2. KOH掩膜的开口（Opening of the KOH-mask）：
  - 使用反应离子刻蚀（RIE）技术打开KOH掩膜。
3. KOH蚀刻（KOH etching）：
  - 对膜进行KOH蚀刻。
4. 金沉积（Deposition of Au）：
  - 在膜上沉积一层金（Au）。
5. 接触垫的结构化（Structuring of the contact-pads）：
  - 对接触垫进行结构化处理。
6. 双步光刻（2-step photolithography）：
  - 使用Ordyl（干膜光刻胶）进行双步光刻。
7. 微型珀尔帖元件的粘合（Bonding of the micro Peltier element）：
  - 将微型珀尔帖元件粘合到膜上。
8. 切割（Dicing）：
  - 对硅片进行切割。
9. 填充和密封（Filling and sealing）：
  - 对结构进行填充和密封。
10. 电连接（Electrical contacting）：
  - 进行电连接。
11. 粘贴散热器（Gluing on heat sink）：
  - 将结构粘贴到散热器上。

## 图示说明

右侧的图示展示了微阀的截面结构，包括：

- **Ordyl**: 干膜光刻胶，用于光刻过程。
- 珀尔帖元件（Peltier element）：用于加热或冷却工作流体。
- 电连接（Electrical connection）：用于连接电源和控制电路。
- 散热器（Heat sink）：用于散热，保持系统的温度稳定。



这张幻灯片详细展示了微阀的制造过程，从硅片的准备到最终的组装和密封，强调了每个步骤的重要性和具体操作。

## P24

### 阀门的制造过程（Fabrication of the valve）

#### 制造步骤

1. 在晶圆级制造（Fabrication on wafer level）：
  - 阀门的制造从晶圆级开始，多个阀门在同一块晶圆上进行加工。
2. 切割、填充和密封执行器腔（Dicing, filling and sealing of the actuator chamber）：
  - 对晶圆进行切割，将每个阀门分离出来。
  - 对执行器腔进行填充和密封，确保其功能正常。
3. 粘贴流体连接（Gluing of the fluidic connection）：
  - 将流体连接部分粘贴到阀门上，确保流体可以顺利进出。
4. 集成到测试装置中（Integration into the test setup）：
  - 将制造好的阀门集成到测试装置中，进行功能测试和验证。

#### 图示说明

幻灯片右侧展示了制造过程中的一些关键步骤和成品：

- **晶圆级制造**：展示了在晶圆上加工的多个阀门。
- **切割和密封**：展示了切割后的单个阀门，以及填充和密封后的执行器腔。
- **流体连接**：展示了粘贴了流体连接部分的阀门。
- **测试装置集成**：展示了集成到测试装置中的阀门，进行功能测试。

这张幻灯片详细展示了阀门的制造过程，从晶圆级制造到最终的测试装置集成，强调了每个步骤的重要性和具体操作。

## 热力机械（Thermo-mechanic）

### 主要内容

1. 气体作为工作流体（Gas as working fluid）：
  - 使用气体作为工作流体。
2. 理想气体定律（Ideal gas law）：
  - 公式： $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$
  - 其中， $p$  是压力， $V$  是体积， $n$  是气体的摩尔数， $R$  是气体常数， $T$  是温度。

### 工作原理

- 工作温度（Working temperature）：由密封温度（sealing temperature）设定。
- 气体循环过程：
  - 图中展示了气体在不同状态下的循环过程，标记了不同的压力和体积变化。
  - 加热（ $Q_{in}$ ）：当气体被加热时，压力增加，膜向上弯曲，关闭阀门。
  - 冷却（ $Q_{out}$ ）：当气体被冷却时，压力降低，膜向下弯曲，打开阀门。

### 图表和数据

- 气体循环图（PV图）：
  - 横轴表示体积（ $V$ ），纵轴表示压力（ $P$ ）。
  - 标记了不同状态下的压力和体积变化。
  - $T_{up}$  和  $T_{down}$  分别表示加热和冷却时的温度。
- 膜特性数据：
  - 膜半径（ $r_{mem}$ ）：2.0毫米（mm）
  - 加热温度（ $T_{up}$ ）：55.3摄氏度（ $^{\circ}C$ ）
  - 冷却温度（ $T_{down}$ ）：-10.7摄氏度（ $^{\circ}C$ ）
  - 温差（ $\Delta T$ ）：66.0开尔文（K）

### 解释

1. 气体作为工作流体：使用气体作为工作流体，通过加热和冷却来控制膜的状态。
2. 理想气体定律：描述了气体在不同状态下的压力、体积和温度关系。
3. 工作温度：由密封温度设定，确保系统在预定温度范围内工作。
4. 气体循环过程：通过加热和冷却气体，改变气体的压力，从而控制膜的状态，达到控制阀门开关的目的。

这张幻灯片详细展示了热力机械原理，强调了气体作为工作流体的重要性，以及通过加热和冷却控制膜状态的过程。

## P26

### 切换特性（Switching characterisation）

#### 主要内容

1. 填充**HFE 7100**（Filled with HFE 7100）：
  - 使用有机冷却剂HFE 7100进行填充。

#### 系统组件

- 流体储存器（Fluidic reservoir）：存储工作流体。
- 压力控制器（Pressure controller）：控制流体的压力。
- 流量测量（Flow measurement）：测量流体的流量。
- 收集容器（Collection container）：收集流体。
- 温度控制（Temperature control）：控制系统的温度。
- 散热器（Heat sink）：用于散热，保持系统的温度稳定。
- **LabVIEW**：用于数据采集和控制的图形化编程环境。

#### 图表和数据

- 温度与泵压关系图：
  - 横轴表示泵压（Pump pressure），单位为帕斯卡（Pa）。
  - 纵轴表示温度（Temperature），单位为摄氏度（°C）。
  - 图中展示了测量和理论的开关温度（Messung schließen, Messung öffnen, Theorie schließen, Theorie öffnen）。
- 流量与泵压关系图：
  - 横轴表示泵压（Pump pressure），单位为千帕（kPa）。
  - 纵轴表示流量（Flow rate），单位为毫升每分钟（ml/min）。
  - 图中展示了芯片01（Chip 01）的流量与泵压关系。

#### 解释

1. 填充**HFE 7100**：使用有机冷却剂HFE 7100填充系统，以确保系统在适当的温度范围内工作。

2. **系统组件**：包括流体储存器、压力控制器、流量测量、收集容器、温度控制和散热器，使用LabVIEW进行数据采集和控制。
3. **温度与泵压关系**：图表展示了在不同泵压下的温度变化，比较了测量值和理论值。
4. **流量与泵压关系**：图表展示了在不同泵压下的流量变化，展示了芯片01的性能。

这张幻灯片详细展示了切换特性的实验设置和结果，强调了使用HFE 7100作为冷却剂的重要性，以及系统在不同泵压下的温度和流量特性。

## P27

### 特性表征（Characterisation）

#### 系统组件

- **激光距离传感器**（Laser distance sensor）：用于测量膜的位置。
- **LabVIEW**：用于数据采集和控制的图形化编程环境。
- **电源**（Power supply）：为系统提供电能。
- **温度控制**（Temperature control）：控制系统的温度。
- **执行器**（Actuator）：用于驱动膜的运动。
- **导电胶**（Conductive glue）：用于连接电气组件。
- **散热器**（Heat sink）：用于散热，保持系统的温度稳定。
- **珀尔帖冷却器**（Peltier cooler）：用于冷却系统。
- **Pt100**：温度传感器，用于测量温度。
- **冷却水**（Cooling water）：用于冷却系统。

#### 图表和数据

- **膜位置与时间关系图**：
  - 横轴表示时间（Time），单位为秒（s）。
  - 左纵轴表示膜的位置（Membrane position），单位为微米（ $\mu\text{m}$ ）。
  - 右纵轴表示电压（Voltage），单位为伏特（V）。
  - 图中展示了加热脉冲（Heating pulse）和冷却脉冲（Cooling pulse）对膜位置的影响。

#### 结果

- **工作电压**（Operation voltage）： $\pm 7$ 伏特（V）
- **切换脉冲**（Switching pulse）：200毫秒（ms）
- **膜振幅**（Membrane amplitude）：41微米（ $\mu\text{m}$ ）

## 解释

1. **系统组件：**包括激光距离传感器、LabVIEW、电源、温度控制、执行器、导电胶、散热器、珀尔帖冷却器、Pt100温度传感器和冷却水。
2. **膜位置与时间关系：**图表展示了在不同时间点，膜的位置和电压的变化。加热脉冲使膜向上移动，冷却脉冲使膜向下移动。
3. **结果：**工作电压为 $\pm 7$ 伏特，切换脉冲时间为200毫秒，膜的振幅为41微米。

这张幻灯片详细展示了系统的特性表征，强调了各个组件的作用以及膜在不同条件下的位置变化。

## P28

### 用于光学应用的电热双晶片执行器（Electro-thermal bimorph actuator for optical application）

#### 应用（Application）

- 共聚焦显微镜和光学相干显微镜（Confocal microscopy and optical coherence microscopy）：
  - 可以在组织中深达1毫米（1 mm image deep into tissue）进行成像，具有低横向位移和倾斜（low lateral shift and tilt）。

#### 设置（Setup）

- 3组双晶电热执行器（3 sets of bimorph electro-thermal actuators）
- 1个常规玻璃透镜（1 conventional glass lens）

#### 图示说明

右侧的图示展示了电热双晶片执行器的实际照片：

- 组装的玻璃透镜（Assembled Glass Lenses）：展示了透镜的组装情况。
- 尺寸标注：图中标注了1毫米和2毫米的尺寸，展示了组件的实际大小。

## 解释

1. **应用：**电热双晶片执行器主要用于共聚焦显微镜和光学相干显微镜，可以在组织中深达1毫米进行成像，同时保持低横向位移和倾斜。
2. **设置：**系统由3组双晶电热执行器和1个常规玻璃透镜组成。

3. 图示说明：图示展示了实际的执行器和透镜组件，标注了关键尺寸，帮助理解组件的实际大小和结构。

这张幻灯片详细展示了电热双晶片执行器在光学应用中的使用，强调了其在显微镜成像中的优势和具体设置。

## P29

### 执行器设计（Actuator designs）

#### 主要内容

1. 组成：
  - 由三组铝（Al）/二氧化硅（SiO<sub>2</sub>）双晶梁（bimorph beams）组成，这些梁具有不同的线性膨胀系数（different linear expansion），并通过两个框架（frames）连接在一起。
2. 框架和平台：
  - 框架和平台下方有单晶硅（single-crystal silicon），以提供结构刚性（structural rigidity）。
3. 铂加热器（Platinum (Pt) heaters）：
  - 铂加热器嵌入双晶梁中，以实现均匀和高效的加热。
4. 双晶梁的运动：
  - 双晶梁在释放后会向上卷曲（curl up），施加电压后会向下弯曲（bend down）。

#### 设计示例

- 设计I（Design I）：展示了双晶梁和框架的结构示意图。
  - 平台（Platform）
  - 双晶梁I、II、III（Bimorph I, II, III）
  - 框架I、II（Frame I, II）
  - 基板（Substrate）
- 设计II（Design II）：展示了实际的双晶梁和框架的照片，标注了关键尺寸（1毫米和3毫米）。

#### 解释

1. 组成：执行器由三组铝/二氧化硅双晶梁组成，这些梁通过两个框架连接在一起，具有不同的线性膨胀系数。
2. 框架和平台：框架和平台下方有单晶硅，以提供结构刚性，确保执行器的稳定性。
3. 铂加热器：铂加热器嵌入双晶梁中，以实现均匀和高效的加热，确保执行器的快速响应。
4. 双晶梁的运动：双晶梁在释放后会向上卷曲，施加电压后会向下弯曲，从而实现执行器的运动。

这张幻灯片详细展示了执行器的设计和组成，强调了双晶梁、框架和铂加热器在执行器中的关键作用，以及双晶梁在不同条件下的运动特性。

## P30

### 设计I的热模拟（Thermal simulations of design I）

#### 优化梁和框架的尺寸（Optimisation of the beam and frame dimensions）

- 梁长度（Beam lengths）：150微米、300微米、150微米（ $l_1, l_2, l_3$ ）
- 框架长度（Frame lengths）：500微米（ $L_1$  和  $L_2$ ）
- 平台（Platform）：800微米
- 由于内部应力引起的初始高度（Initial elevation due to internal stress）：646微米

#### 热膨胀系数（Thermal expansion coefficients）

- 铝（Al）： $\alpha(\text{Al}) = 23.0 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$
- 二氧化硅（SiO<sub>2</sub>）： $\alpha(\text{SiO}_2) = 0.5 \times 10^{-6} \text{ 1/K}$

#### 图示说明

图示展示了设计I的结构和尺寸标注：

- 梁长度（ $l_1, l_2, l_3$ ）：分别为150微米、300微米和150微米。
- 框架长度（ $L_1, L_2$ ）：均为500微米。
- 平台：800微米。
- 初始高度：由于内部应力引起的初始高度为646微米。
- 横向位移（Lateral shift, LS）：展示了梁和框架在不同角度下的位移情况。

#### 解释

1. 梁和框架的尺寸优化：通过优化梁和框架的长度，确保执行器在工作时具有最佳的性能。
2. 热膨胀系数：铝和二氧化硅具有不同的热膨胀系数，这会影响梁在加热和冷却时的变形。
3. 初始高度：由于内部应力，梁在未加热时具有一定的初始高度。
4. 图示说明：图示详细展示了梁和框架的结构和尺寸，帮助理解设计I的具体构造和热模拟结果。

这张幻灯片详细展示了设计I的热模拟和尺寸优化，强调了不同材料的热膨胀系数对梁变形的影响，以及通过优化尺寸来提高执行器性能的重要性。

# P31

## 设计I的热模拟（Thermal simulations of design I）

### 不同温度下的模拟（Simulations at different temperatures）

- 垂直位移（Vertical displacement）：1116微米（ $\mu\text{m}$ ）
- 横向位移（Lateral shift）：15微米（ $\mu\text{m}$ ）
- 横向倾斜（Lateral tilt）：0.73度（ $^{\circ}$ ）

### 温度条件

- **T = 25°C**：常温条件下的模拟结果。
- **T = 115°C**：中等温度条件下的模拟结果。
- **T = 215°C**：高温条件下的模拟结果。

### 图示说明

图示展示了在不同温度条件下，设计I的结构变形情况：

- **(a) T = 25°C**：在常温条件下，结构的变形较小。
- **(b) T = 115°C**：在中等温度条件下，结构开始发生明显变形。
- **(c) T = 215°C**：在高温条件下，结构的变形达到最大。

### 解释

1. 垂直位移：在不同温度条件下，结构的垂直位移达到1116微米。
2. 横向位移：在不同温度条件下，结构的横向位移为15微米。
3. 横向倾斜：在不同温度条件下，结构的横向倾斜为0.73度。
4. 温度条件：模拟了常温、中等温度和高温条件下的结构变形情况。
5. 图示说明：图示展示了在不同温度条件下，设计I的结构变形情况，帮助理解温度对结构变形的影响。

这张幻灯片详细展示了设计I在不同温度条件下的热模拟结果，强调了温度对结构变形的影响，以及在不同温度下的垂直位移、横向位移和横向倾斜情况。



## 制造过程（Fabrication process）

### 制造步骤

1. 铂溅射和剥离（Pt sputtering & lift-off）：
  - 二氧化硅厚度（ $t(\text{SiO}_2)$ ）：1微米（ $\mu\text{m}$ ）
  - 铂厚度（ $t(\text{Pt})$ ）：0.2微米（ $\mu\text{m}$ ）
2. 隔离层（Isolation layer）：
  - 二氧化硅厚度（ $t(\text{SiO}_2)$ ）：0.1微米（ $\mu\text{m}$ ）
3. 铝沉积（Aluminium deposition）：
  - 铝厚度（ $t(\text{Al})$ ）：1微米（ $\mu\text{m}$ ）
4. 剥离过程（Lift-off for Al/SiO<sub>2</sub> bimorph beams, frames and platform）：
  - 包括步骤d到f。

### 图示说明

图示展示了制造过程的各个步骤：

- **(a) 铂溅射和剥离**：在基底上溅射铂并进行剥离。
- **(b) PECVD介电氧化物**：沉积介电氧化物层。
- **(c) 铝电子束蒸发和剥离**：通过电子束蒸发沉积铝并进行剥离。
- **(d) 前侧二氧化硅干法刻蚀**：对前侧的二氧化硅进行干法刻蚀。
- **(e) 背侧二氧化硅刻蚀和深反应离子刻蚀（DRIE）**：对背侧的二氧化硅进行刻蚀和深反应离子刻蚀。
- **(f) 前侧DRIE**：对前侧进行深反应离子刻蚀。
- **前侧各向同性刻蚀**：对前侧进行各向同性刻蚀。

### 解释

1. 铂溅射和剥离：在基底上溅射一层铂，并进行剥离以形成所需的图案。
2. 隔离层：沉积一层薄的二氧化硅作为隔离层。
3. 铝沉积：通过电子束蒸发沉积一层铝，并进行剥离以形成所需的图案。
4. 剥离过程：包括对双晶梁、框架和平台的剥离，确保结构的完整性和功能性。
5. 图示说明：图示详细展示了每个制造步骤，帮助理解整个制造过程。

这张幻灯片详细展示了制造过程的各个步骤，强调了铂溅射、隔离层沉积、铝沉积和剥离过程的重要性，以及每个步骤的具体操作。

# P33

## 负载 - 透镜（Loads - lenses）

### 组装（Assembly）

- **BK7玻璃微透镜（BK7 glass microlenses）**：通过紫外线固化光学胶（UV-cured optical adhesive）将BK7玻璃微透镜组装到MEMS透镜支架上，透镜支架释放后进行组装。

### 设计II的透镜参数（Lens parameters of design II）

- **类型A（Type A）**：
  - 直径（Diameter）：0.7毫米（mm）
  - 焦距（Focal length）：2毫米（mm）
  - 质量（Mass）：0.29毫克（mg）
- **类型B（Type B）**：
  - 直径（Diameter）：1毫米（mm）
  - 焦距（Focal length）：3毫米（mm）
  - 质量（Mass）：1.97毫克（mg）

### 图示说明

图示展示了组装后的玻璃透镜：

- 左图：展示了一个组装好的玻璃透镜，标注了1毫米的尺寸。
- 右图：展示了另一个组装好的玻璃透镜，标注了2毫米的尺寸。

### 解释

1. **组装**：BK7玻璃微透镜通过紫外线固化光学胶组装到MEMS透镜支架上，确保透镜在支架释放后能够稳定固定。
2. **透镜参数**：设计II中包含两种类型的透镜，类型A和类型B，分别具有不同的直径、焦距和质量。
3. **图示说明**：图示展示了组装后的玻璃透镜，帮助理解透镜的实际尺寸和组装效果。

这张幻灯片详细展示了负载透镜的组装过程和设计II的透镜参数，强调了不同类型透镜的尺寸、焦距和质量，以及通过图示展示了组装后的实际效果。

## 静态执行器特性表征 (Static actuator characterisation)

### 设计I (Design I)

- 垂直位移 (Vertical displacement)：在5.5伏 (V) 时达到610微米 ( $\mu\text{m}$ )
- 低滞后 (Low hysteresis)
- 横向位移 (Lateral shift)：10微米 ( $\mu\text{m}$ )
- 横向倾斜 (Lateral tilt)：0.73度 ( $^{\circ}$ )

### 设计II (Design II)

- 垂直位移 (Vertical displacement)：在3.7伏 (V) 时达到900微米 ( $\mu\text{m}$ )
- 透镜重量影响小 (Low influence of the lens weight)
- 横向位移 (Lateral shift)：7微米 ( $\mu\text{m}$ )
- 横向倾斜 (Lateral tilt)：0.38度 ( $^{\circ}$ )

### 图表说明

- 设计I的图表：
  - 横轴表示电压 (Voltage)，单位为伏特 (V)。
  - 纵轴表示垂直位移 (Vertical Displacement)，单位为微米 ( $\mu\text{m}$ )。
  - 图中展示了随着电压增加和减少时的垂直位移变化，误差为 $\pm 0.5$ 微米。
- 设计II的图表：
  - 横轴表示电压 (Voltage)，单位为伏特 (V)。
  - 纵轴表示垂直位移 (Vertical Displacement)，单位为微米 ( $\mu\text{m}$ )。
  - 图中展示了空透镜支架 (Empty lens holder)、透镜A (Lens A) 和透镜B (Lens B) 的垂直位移变化。

### 解释

#### 1. 设计I:

- 在5.5伏时，垂直位移达到610微米，具有低滞后特性。
- 横向位移为10微米，横向倾斜为0.73度。
- 图表展示了随着电压变化的垂直位移，误差为 $\pm 0.5$ 微米。

#### 2. 设计II:

- 在3.7伏时，垂直位移达到900微米，透镜重量对位移的影响较小。
- 横向位移为7微米，横向倾斜为0.38度。
- 图表展示了空透镜支架和不同透镜的垂直位移变化。

这张幻灯片详细展示了设计I和设计II的静态执行器特性，强调了不同设计在不同电压下的垂直位移、横向位移和横向倾斜特性，以及透镜重量对设计II的影响。

# P35

## 动态执行器特性表征（Dynamic actuator characterisation）

### 设计I（Design I）

- 共振频率（Resonance frequency）：453赫兹（Hz）
- 响应时间（Response time）：25毫秒（ms）

### 设计II（Design II）

- 共振频率（Resonance frequency）：257赫兹（Hz）
- 透镜A的共振频率（Resonance frequency lens A）：158赫兹（Hz）
- 透镜B的共振频率（Resonance frequency lens B）：79赫兹（Hz）

### 图表说明

- 设计I的图表：
  - 横轴表示频率（Frequency），单位为千赫兹（KHz）。
  - 纵轴表示垂直位移（Vertical Displacement），单位为纳米（nm）。
  - 图中展示了设计I的共振频率为453赫兹。
- 设计II的图表：
  - 横轴表示频率（Frequency），单位为赫兹（Hz）。
  - 纵轴表示归一化扫描范围（Normalized scan range），单位为任意单位（a.u.）。
  - 图中展示了空透镜支架（Empty lens holder）、透镜A（Lens A）和透镜B（Lens B）的共振频率。

### 公式

- 自然频率公式（Natural frequency formula）： $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 
  - 其中， $\omega_0$  是自然频率， $k$  是刚度， $m$  是质量。

### 解释

1. 设计I:

- 共振频率为453赫兹，响应时间为25毫秒。
- 图表展示了设计I在不同频率下的垂直位移变化，共振频率为453赫兹。

## 2. 设计II:

- 空透镜支架的共振频率为257赫兹，透镜A的共振频率为158赫兹，透镜B的共振频率为79赫兹。
- 图表展示了设计II在不同频率下的归一化扫描范围变化，分别展示了空透镜支架、透镜A和透镜B的共振频率。

3. 自然频率公式：公式展示了自然频率与刚度和质量之间的关系，帮助理解共振频率的计算。

这张幻灯片详细展示了设计I和设计II的动态执行器特性，强调了不同设计在不同频率下的共振频率和响应时间，以及透镜重量对设计II共振频率的影响。

# P36

## 设计II的系统特性表征（System characterisation of design II）

### 电压条件（Voltage conditions）

- $U = 0\text{ V}$ ：无电压条件下的系统状态。
- $U = 2\text{ V}$ ：2伏电压条件下的系统状态。
- $U = 3.5\text{ V}$ ：3.5伏电压条件下的系统状态。

### 图示说明

- 上排图像：展示了在不同电压条件下，设计II的实际照片。
  - (a)  $U = 0\text{ V}$ ：无电压条件下，透镜处于初始位置。
  - (b)  $U = 2\text{ V}$ ：2伏电压条件下，透镜开始移动。
  - (c)  $U = 3.5\text{ V}$ ：3.5伏电压条件下，透镜移动到最大位置，标注了X和Y方向。
- 下排图像：展示了在不同电压条件下，透镜的位移情况。
  - (a)  $U = 0\text{ V}$ ：无电压条件下，透镜未移动。
  - (b)  $U = 2\text{ V}$ ：2伏电压条件下，透镜有一定位移。
  - (c)  $U = 3.5\text{ V}$ ：3.5伏电压条件下，透镜位移达到最大，标注了50微米的尺寸。

### 解释

1. 电压条件：展示了在不同电压条件下，设计II的系统状态。
  - 无电压（ $U = 0\text{ V}$ ）时，透镜处于初始位置。
  - 2伏电压（ $U = 2\text{ V}$ ）时，透镜开始移动。

- 3.5伏电压 ( $U = 3.5\text{ V}$ ) 时, 透镜移动到最大位置。

2. 图示说明: 上排图像展示了在不同电压条件下, 设计II的实际照片, 帮助理解透镜在不同电压下的移动情况。下排图像展示了透镜的位移情况, 标注了50微米的尺寸, 帮助理解透镜的实际位移量。

这张幻灯片详细展示了设计II在不同电压条件下的系统特性, 强调了透镜在不同电压下的移动情况和位移量。

## P38

### 双向运动 (Two directions of motion)

#### 主要组件 (Main Components)

- 内双金属片驱动器 (**Inner bimorph actuator**): 用于缓慢的平面外运动 (slow out-of-plane)。
- 外梳齿驱动器 (**Outer comb drives**): 用于快速的平面内运动 (fast in-plane)。
- 微平台 (**Micro-platform**): 中央的移动平台。
- 中框架 (**Middle frame**): 支撑结构。
- 电气隔离沟槽 (**Electrical isolation trench**): 用于电气隔离。
- 平面折叠梁 (**In-plane folded beam**): 用于平面内运动的结构。

#### 细节说明 (Detailed Explanation)

- 图(a): 展示了整个系统的三维结构。内双金属片驱动器和外梳齿驱动器分别用于不同方向的运动。
- 图(b): 放大显示了双金属片驱动器和梳齿驱动器的细节。
  - 薄膜双金属片 (**Thin film bimorph**): 不含硅的双金属片。
  - 梳齿驱动器 (**Comb drives**): 全硅材料的梳齿驱动器。
- 图(c): 展示了双金属片的结构和工作原理。
  - 双金属片II (**Bimorph II**): 长度为 $L_2$ 。
  - 双金属片I (**Bimorph I**): 长度为 $L_1$ 。
  - 刚性段 (**Rigid segment**): 连接双金属片的刚性部分。
  - 铜 (**Cu**): 双金属片中的铜材料。

#### 运动方向 (Directions of Motion)

- 热双金属片 (**Thermal bimorphs**): 用于缓慢的平面外运动 (slow out-of-plane)。
- 静电梳齿驱动器 (**Electrostatic comb drives**): 用于快速的平面内运动 (fast in-plane)。

## 解释 (Explanation)

1. 内双金属片驱动器 (**Inner bimorph actuator**)：通过热膨胀和收缩实现缓慢的平面外运动。
2. 外梳齿驱动器 (**Outer comb drives**)：通过静电力实现快速的平面内运动。
3. 微平台 (**Micro-platform**)：中央的移动平台，可以在不同方向上移动。
4. 电气隔离沟槽 (**Electrical isolation trench**)：确保不同驱动器之间的电气隔离，防止干扰。

这张图展示了一个微机电系统 (MEMS) 的设计，结合了热双金属片和静电梳齿驱动器，实现了双向运动的功能。

## P39

### 工艺与结构 (Process and Structures)

#### 左侧图示 (Left Side Illustrations)

这些图示展示了微机电系统 (MEMS) 制造过程中的各个步骤。每个步骤都标注了不同材料的层次和结构。

- **(a)**: 初始状态，展示了硅 (Si)、二氧化硅 (SiO<sub>2</sub>)、铜 (Cu)、钨 (W)、铝 (Al) 和光刻胶 (PR) 的层次。
- **(b)**: 在初始状态基础上，进行了一些加工步骤。
- **(c)**: 进一步加工，形成了更复杂的结构。
- **(d)**: 继续加工，展示了更多的细节。
- **(e)**: 进一步蚀刻，形成了更深的结构。
- **(f)**: 继续蚀刻，展示了更复杂的结构。
- **(g)**: 接近最终形态，展示了完整的结构。
- **(h)**: 最终状态，展示了完整的微机电系统结构。

#### 右侧图像 (Right Side Images)

这些图像展示了实际制造出的微机电系统的扫描电子显微镜 (SEM) 照片。

- **(a)**: 展示了整个微机电系统的俯视图，可以看到完整的结构和细节。
- **(b)**: 放大显示了 Cu/W 双金属片 (bimorph) 的细节，展示了其层次结构。
- **(c)**: 展示了梳齿驱动器 (comb drives) 的细节，可以看到其精细的结构。

## 材料标注（Material Annotations）

- **Si:** 硅
- **SiO<sub>2</sub>:** 二氧化硅
- **Cu:** 铜
- **W:** 钨
- **Al:** 铝
- **PR:** 光刻胶

## 解释（Explanation）

1. 工艺步骤（**Process Steps**）：左侧图示展示了微机电系统制造过程中的各个步骤，从初始状态到最终结构。每个步骤都展示了不同材料的层次和结构变化。
2. 实际结构（**Actual Structures**）：右侧图像展示了实际制造出的微机电系统的扫描电子显微镜照片，帮助理解实际结构和细节。
3. 材料标注（**Material Annotations**）：图示中使用不同颜色标注了不同的材料，帮助理解各个层次和结构的组成。

通过这些图示和图像，可以清晰地了解微机电系统的制造过程和最终结构。

# P40

## 动态特性（Dynamics）

### 左上图（Top Left Graph）

- 图示内容：展示了双金属片（bimorphs）在不同直流电压（DC voltage）下的位移（Displacement）。
- 横轴（**X-axis**）：施加的直流电压（DC voltage applied），单位为伏特（V）。
- 纵轴（**Y-axis**）：位移（Displacement），单位为微米（ $\mu\text{m}$ ）。
- 数据点：红色圆点表示测量值，误差为 $\pm 0.5$ 微米。
- 拟合曲线：蓝色线条表示线性拟合（Linear fit）。

### 右上图（Top Right Graph）

- 图示内容：展示了双金属片（bimorphs）在不同频率（Frequency）下的归一化幅度（Normalized Magnitude）。
- 横轴（**X-axis**）：频率（Frequency），单位为赫兹（Hz）。



- 纵轴（**Y-axis**）：归一化幅度（Normalized Magnitude），单位为分贝（dB）。
- 数据点：红色线条表示测量值。

## 左下图（Bottom Left Graph）

- 图示内容：展示了梳齿驱动器（comb drives）在不同直流电压（DC voltage）下的位移（Displacement）。
- 横轴（**X-axis**）：施加的直流电压（DC voltage applied），单位为伏特（V）。
- 纵轴（**Y-axis**）：位移（Displacement），单位为微米（ $\mu\text{m}$ ）。
- 数据点：蓝色三角形表示测量值，误差为 $\pm 0.05$ 微米。
- 拟合曲线：红色线条表示计算值（Calculation），间隙为3.5微米。

## 右下图（Bottom Right Graph）

- 图示内容：展示了梳齿驱动器（comb drives）在不同频率（Frequency）下的归一化位移（Normalized Displacement）。
- 横轴（**X-axis**）：频率（Frequency），单位为赫兹（Hz）。
- 纵轴（**Y-axis**）：归一化位移（Normalized Displacement），单位为分贝（dB）。
- 数据点：蓝色线条表示测量值。

## 解释（Explanation）

### 1. 双金属片的位移（Displacement of Bimorphs）：

- 左上图展示了双金属片在不同直流电压下的位移，随着电压的增加，位移也逐渐增加，且呈现出线性关系。
- 右上图展示了双金属片在不同频率下的归一化幅度，频率增加时，幅度逐渐减小。

### 2. 梳齿驱动器的位移（Displacement of Comb Drives）：

- 左下图展示了梳齿驱动器在不同直流电压下的位移，随着电压的增加，位移也逐渐增加，且与计算值吻合较好。
- 右下图展示了梳齿驱动器在不同频率下的归一化位移，频率增加时，位移逐渐增加。

### 3. 误差分析（Error Analysis）：

- 左上图和左下图中都标注了测量误差，分别为 $\pm 0.5$ 微米和 $\pm 0.05$ 微米，表明测量结果的精度。

### 4. 动态响应（Dynamic Response）：

- 这些图表展示了双金属片和梳齿驱动器在不同电压和频率条件下的动态响应，帮助理解其工作特性和性能。

通过这些图表，可以清晰地了解双金属片和梳齿驱动器在不同条件下的动态特性和响应情况。

## 热膨胀用于任意形状的快速原型制作（Thermal expansion for rapid prototyping for arbitrary shapes）

### 主要特点（Key Features）

- 坚固的固态设备（**Robust solid state devices**）：设备结构坚固，适用于各种应用。
- 更多“微型”（**More "micro"**）：设备尺寸更小，更加微型化。
- 尺寸可扩展（**Scalable in size**）：设备尺寸可以根据需求进行扩展。
- 兼容阵列（**Array compatible**）：设备可以兼容阵列结构，适用于大规模生产。
- 固有的光学表面质量（**Intrinsic optical surface quality**）：
  - 粗糙度（**Roughness**）：小于波长的 $1/10$ （ $\lambda/10$ ）。
  - 形状偏差（**Deviation from shape**）：小于波长的 $1/4$ （ $\lambda/4$ ）。

### 图示说明（Illustration Explanation）

- 光学表面（**Optical surface**）：图中绿色部分表示光学表面，具有高质量的光学特性。
- 铸造软聚合物（**Cast soft polymer**）：图中浅绿色部分表示铸造的软聚合物，用于形成光学表面。
- 任意模具（**Arbitrary mold**）：图中右侧表示任意形状的模具，用于制造不同形状的设备。
- 粗糙结构的光刻胶（**Roughly structured resist**）：图中蓝色部分表示粗糙结构的光刻胶，用于支撑和成型。

### 解释（Explanation）

1. 坚固的固态设备（**Robust solid state devices**）：这些设备结构坚固，能够在各种环境下稳定工作。
2. 更多“微型”（**More "micro"**）：设备尺寸更小，更加适合微型化应用。
3. 尺寸可扩展（**Scalable in size**）：设备的尺寸可以根据需求进行扩展，适用于不同规模的应用。
4. 兼容阵列（**Array compatible**）：设备可以兼容阵列结构，适用于大规模生产和应用。
5. 固有的光学表面质量（**Intrinsic optical surface quality**）：设备的光学表面质量高，粗糙度小于波长的 $1/10$ ，形状偏差小于波长的 $1/4$ ，确保了高质量的光学性能。

通过这些特点和图示，可以清晰地了解热膨胀技术在快速原型制作中的应用，特别是对于任意形状的设备制造。

## 通过温度调节（Tunability by temperature）

### 主要特点（Key Features）

- 热膨胀（Thermal expansion）：利用热膨胀效应来调节设备的性能。
  - 线性效应（Linear effect）：热膨胀具有线性效应，因此可以很好地控制（well controllable）。

### 图示说明（Illustration Explanation）

- 光学表面（Optical surface）：图中绿色部分表示光学表面，具有高质量的光学特性。
- 软聚合物（Soft polymer）：图中浅绿色部分表示软聚合物，用于形成光学表面。
- 任意模具（Arbitrary mold）：图中右侧表示任意形状的模具，用于制造不同形状的设备。
- 结构化光刻胶（Structured resist）：图中蓝色部分表示结构化的光刻胶，用于支撑和成型。
- 红色箭头（Red arrows）：表示热膨胀的方向和效果。

### 解释（Explanation）

1. 热膨胀（Thermal Expansion）：通过加热设备，利用材料的热膨胀效应来调节设备的性能和形状。
2. 线性效应（Linear Effect）：热膨胀具有线性效应，因此可以很好地控制设备的形状和性能。
3. 光学表面（Optical Surface）：通过热膨胀，可以形成高质量的光学表面，适用于各种光学应用。
4. 软聚合物（Soft Polymer）：软聚合物在热膨胀过程中起到关键作用，帮助形成光学表面。
5. 任意模具（Arbitrary Mold）：可以使用任意形状的模具，通过热膨胀来制造不同形状的设备。
6. 结构化光刻胶（Structured Resist）：结构化的光刻胶提供了支撑和成型的基础，确保设备的稳定性和精度。

通过这些特点和图示，可以清晰地了解如何利用热膨胀效应来调节设备的性能和形状，特别是对于光学表面的制造和控制。

锥形镜的快速原型制作 -> 使用紫外激光成型 (**Rapid prototyping of conical mirrors -> mold by UV laser**)

左侧图示 (**Left Side Illustration**)

- 激光结构 (**Laser-structure**)：使用紫外激光在材料表面形成的结构。
- 插图 (**Inset Image**)：展示了实际制造出的锥形镜的显微照片，显示了其精细的结构。

右侧图示 (**Right Side Illustration**)

- 液体介电材料 (**Liquid dielectric**)：填充在模具中的液体介电材料，用于形成锥形镜的光学表面。

主要特点 (**Key Features**)

- 10层工艺 (**10-layer process**)：制造过程涉及10层不同的材料和工艺步骤。
- 横向分辨率 (**Lateral resolution**)：25微米 (μm)，表示在平面内的分辨率。
- 轴向分辨率 (**Axial resolution**)：10微米 (μm)，表示在垂直方向上的分辨率。
- **PECVD Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>**：100纳米 (nm)，表示使用等离子增强化学气相沉积 (PECVD) 方法沉积的氮化硅 (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) 层的厚度。

右侧说明 (**Right Side Explanation**)

- 软PDMS Sylgard 184的铸造 (**Casting of soft PDMS Sylgard 184**)：使用软聚二甲基硅氧烷 (PDMS) Sylgard 184进行铸造，形成锥形镜的光学表面。
- 填充略多于必要量 (**Fill in slightly more than necessary**)：在铸造过程中，填充的材料略多于必要量，以确保形成完整的光学表面。

解释 (**Explanation**)

1. 激光结构 (**Laser-structure**)：使用紫外激光在材料表面形成精细的结构，用于制造锥形镜。
2. 10层工艺 (**10-layer process**)：制造过程涉及10层不同的材料和工艺步骤，确保形成高质量的光学表面。
3. 高分辨率 (**High Resolution**)：横向分辨率为25微米，轴向分辨率为10微米，确保了结构的精细度和精确度。
4. **PECVD Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>**：使用PECVD方法沉积的氮化硅层，厚度为100纳米，提供了良好的光学性能和机械强度。

5. 软PDMS Sylgard 184的铸造（**Casting of soft PDMS Sylgard 184**）：使用软PDMS材料进行铸造，形成光学表面，确保了光学性能。
6. 填充略多于必要量（**Fill in slightly more than necessary**）：在铸造过程中，填充的材料略多于必要量，以确保形成完整的光学表面，避免缺陷。

通过这些特点和图示，可以清晰地了解使用紫外激光成型技术制造锥形镜的过程和关键步骤。

## P44

### 镜片芯片的制造和组装（**Mirror chip fabrication and assembly**）

#### 左侧图示（**Left Side Illustration**）

- 铝（**Aluminum**）：图中灰色部分表示蒸发铝层，用于反射光线。
- 氮化硅（**Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>**）：图中蓝色部分表示使用低压化学气相沉积（LPCVD）方法沉积的氮化硅层。
- 对准结构（**Alignment-structure**）：图中标注的对准结构，用于确保镜片芯片的精确对准。

#### 右侧图示（**Right Side Illustration**）

- 镜片基板（**Mirror-substrate**）：图中灰色部分表示镜片基板，提供结构支撑。
- 铝（**Aluminum**）：图中灰色部分表示蒸发铝层，用于反射光线。
- PDMS：图中绿色部分表示聚二甲基硅氧烷（PDMS），用于形成光学表面。

#### 主要特点（**Key Features**）

- 镜片基板（**Mirror substrate**）：提供结构支撑和稳定性。
- **LPCVD Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>**：使用低压化学气相沉积方法沉积的氮化硅层，提供良好的光学性能和机械强度。
- 蒸发铝（**Evaporated aluminum**）：用于形成反射光线的铝层。
- 激光加工的对准结构（**Laser-processed alignment structures**）：确保镜片芯片的精确对准。

#### 右侧说明（**Right Side Explanation**）

- 镜片芯片与光学表面朝向PDMS的粘合（**Gluing of mirror chip with optical surface facing PDMS**）：将镜片芯片的光学表面朝向PDMS进行粘合。
- 在60°C下固化（**Curing at 60°C**）：在60°C下进行固化，此时液态聚合物处于膨胀状态（expanded state）。

## 解释 (Explanation)

1. 镜片基板 (**Mirror Substrate**)：提供结构支撑和稳定性，确保镜片芯片的整体性能。
2. **LPCVD Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>**：使用低压化学气相沉积方法沉积的氮化硅层，提供良好的光学性能和机械强度。
3. 蒸发铝 (**Evaporated Aluminum**)：用于形成反射光线的铝层，确保高效的光学反射。
4. 激光加工的对准结构 (**Laser-processed Alignment Structures**)：通过激光加工形成的对准结构，确保镜片芯片的精确对准，提高制造精度。
5. 镜片芯片与光学表面朝向PDMS的粘合 (**Gluing of Mirror Chip with Optical Surface Facing PDMS**)：将镜片芯片的光学表面朝向PDMS进行粘合，确保光学表面的质量和性能。
6. 在60°C下固化 (**Curing at 60°C**)：在60°C下进行固化，此时液态聚合物处于膨胀状态，确保粘合效果和结构稳定性。

通过这些特点和图示，可以清晰地了解镜片芯片的制造和组装过程，以及各个步骤的关键技术和材料。

## P45

### 镜片蚀刻和形状形成 (Mirror etch and shape formation)

#### 左侧图示 (Left Side Illustration)

- 暴露的铝 (**Exposed aluminum**)：图中灰色部分表示暴露的铝层，用于形成镜面。
- 氮化硅 (**Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>**)：图中蓝色部分表示氮化硅层，作为蚀刻停止层。
- 软聚合物 (**Soft polymer**)：图中绿色部分表示软聚合物，用于支撑和成型。

#### 右侧图示 (Right Side Illustration)

- 应力释放 (**Release of stress**)：图中红色箭头表示在固化的软聚合物中释放的应力。
- 镜片偏转 (**Deflection of mirror**)：图中显示了镜片偏转成轴锥形 (axicon shape)。

#### 主要特点 (Key Features)

- **KOH蚀刻硅背面 (KOH etch of Si back side)**：使用氢氧化钾 (KOH) 蚀刻硅的背面，形成所需的结构。
- **氮化硅作为蚀刻停止层 (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> serves as etch stop)**：氮化硅层作为蚀刻停止层，防止过度蚀刻。
- **暴露的铝表面作为镜面 (Open aluminum surface as mirror)**：暴露的铝表面用于形成高反射率的镜面。

## 右侧说明（Right Side Explanation）

- 释放固化软聚合物中的应力（**Release of stress in cured soft polymer**）：在固化的软聚合物中释放应力，导致镜片形状的变化。
- 镜片偏转成轴锥形（**Deflection of mirror to axicon shape**）：应力释放后，镜片偏转成轴锥形，形成所需的光学形状。

## 解释（Explanation）

1. **KOH蚀刻硅背面（KOH Etch of Si Back Side）**：使用氢氧化钾（KOH）蚀刻硅的背面，形成所需的结构。
2. **氮化硅作为蚀刻停止层（Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Serves as Etch Stop）**：氮化硅层作为蚀刻停止层，防止过度蚀刻，确保结构的精确性。
3. **暴露的铝表面作为镜面（Open Aluminum Surface as Mirror）**：暴露的铝表面用于形成高反射率的镜面，确保光学性能。
4. **释放固化软聚合物中的应力（Release of Stress in Cured Soft Polymer）**：在固化的软聚合物中释放应力，导致镜片形状的变化。
5. **镜片偏转成轴锥形（Deflection of Mirror to Axicon Shape）**：应力释放后，镜片偏转成轴锥形，形成所需的光学形状，确保光学性能和精度。

通过这些特点和图示，可以清晰地了解镜片蚀刻和形状形成的过程，以及各个步骤的关键技术和材料。

## P46

## 制造的2x2阵列（Manufactured 2x2 array）

### 左侧图像（Left Side Image）

- **2x2阵列（2x2 array）**：展示了制造出的2x2阵列，每个单元都是一个锥形镜。
- **比例尺（Scale bar）**：图中标注了1毫米的比例尺，用于显示阵列的实际尺寸。

### 右侧图表（Right Side Graph）

- **偏转（Deflection）**：展示了锥形镜的偏转曲线。
  - **横轴（X-axis）**：半径（Radius），单位为微米（ $\mu\text{m}$ ）。
  - **纵轴（Y-axis）**：偏转（Deflection），单位为微米（ $\mu\text{m}$ ）。
  - **红色实线（Red solid line）**：表示实际测量的偏转曲线。
  - **黑色虚线（Black dashed line）**：表示理想的锥形形状（Ideal conical shape）。

- 插图（**Inset Image**）：展示了锥形镜的三维形状图，显示了其实际形状和偏转情况。

## 解释（**Explanation**）

1. **2x2阵列（2x2 Array）**：左侧图像展示了制造出的2x2阵列，每个单元都是一个锥形镜。通过这种阵列结构，可以实现多点光学应用。
2. **偏转曲线（Deflection Curve）**：右侧图表展示了锥形镜的偏转曲线，红色实线表示实际测量的偏转曲线，黑色虚线表示理想的锥形形状。通过比较实际测量值和理想值，可以评估制造精度和质量。
3. **三维形状图（3D Shape Image）**：插图展示了锥形镜的三维形状图，显示了其实际形状和偏转情况，帮助理解其光学性能和结构特性。

通过这些图像和图表，可以清晰地了解制造出的2x2阵列的实际形状和偏转情况，以及其光学性能和制造精度。

## P47

### 轴锥顶角的热控制（**Thermal control of axicon's apex angle**）

#### 左侧图表（**Left Side Graph**）

- 镜片角度（**Mirror angle**）：展示了不同温度（ $T$ ）下镜片角度的变化。
  - 横轴（**X-axis**）：温度（Temperature），单位为摄氏度（ $^{\circ}\text{C}$ ）。
  - 纵轴左侧（**Y-axis left side**）：镜片角度（Mirror angle），单位为毫弧度（mrad）。
  - 纵轴右侧（**Y-axis right side**）：平均绝对偏差（Mean absolute deviation），单位为纳米（nm）。
  - 黑色实线（**Black solid line**）：表示实际测量的镜片角度变化。
  - 黑色虚线（**Black dashed line**）：表示线性拟合（Linear fit）。
  - $\beta$ 公式（ **$\beta$  formula**）：表示镜片角度与温度的线性关系。
  - 凹面（**Concave**）和凸面（**Convex**）：分别表示镜片的凹面和凸面状态。

#### 右侧图像（**Right Side Images**）

- 三维形状图（**3D Shape Images**）：展示了不同温度下镜片的三维形状。
  - $T = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $h = 3.1\text{ }\mu\text{m}$ ：在 $25^{\circ}\text{C}$ 时，镜片的高度为3.1微米，显示为凹面形状。
  - $T = 80^{\circ}\text{C}$ ,  $h = 0.76\text{ }\mu\text{m}$ ：在 $80^{\circ}\text{C}$ 时，镜片的高度为0.76微米，显示为凸面形状。



## 主要特点（Key Features）

- 从锥形偏差测量（**Deviation from cone measured**）：在 $0.15 R < R < 0.95 R$ 范围内测量锥形偏差。
- 偏差小于红光波长的 $1/20$ （**Deviation smaller than  $\lambda/20$  for red light**）：偏差小于红光波长的 $1/20$ ，确保高精度的光学性能。

## 解释（Explanation）

1. 镜片角度变化（**Mirror Angle Variation**）：左侧图表展示了不同温度下镜片角度的变化，随着温度的升高，镜片角度逐渐减小，从凹面状态转变为凸面状态。
2. 线性关系（**Linear Relationship**）：镜片角度与温度之间存在线性关系，通过 $\beta$ 公式表示，便于预测和控制镜片角度。
3. 三维形状图（**3D Shape Images**）：右侧图像展示了不同温度下镜片的三维形状，帮助理解镜片在不同温度下的形状变化。
4. 高精度光学性能（**High Precision Optical Performance**）：偏差小于红光波长的 $1/20$ ，确保高精度的光学性能，适用于精密光学应用。
5. 锥形偏差测量（**Deviation from Cone Measured**）：在 $0.15 R < R < 0.95 R$ 范围内测量锥形偏差，确保测量的准确性和可靠性。

通过这些图表和图像，可以清晰地了解轴锥顶角的热控制过程，以及不同温度下镜片角度和形状的变化，确保高精度的光学性能。

# P48

## 自适应贝塞尔光束（Adaptive Bessel beam）

### 左侧图像（Left Side Images）

- 典型贝塞尔光束外观（**Typical Bessel beam appearance**）：展示了在不同温度下贝塞尔光束的外观。
  - **10°C到50°C**：随着温度的升高，贝塞尔光束的形状和位置发生变化。
  - **500微米标尺（500  $\mu\text{m}$  scale）**：用于显示贝塞尔光束的实际尺寸。
  - **三维形状图（3D Shape Image）**：展示了在10°C时贝塞尔光束的三维形状，z轴为27毫米，w为9.36毫弧度。

## 右侧图表（Right Side Graph）

- 贝塞尔光束的强度和宽度（**Intensity and width of Bessel beam**）：展示了贝塞尔光束在不同温度下的强度和宽度变化。
  - 横轴（**X-axis**）：温度（Temperature），单位为摄氏度（ $^{\circ}\text{C}$ ）。
  - 纵轴左侧（**Y-axis left side**）：最大强度（ $I_{\text{max}}$ ），单位为任意单位（arb. units）。
  - 纵轴右侧（**Y-axis right side**）：最大宽度（ $w_{\text{max}}$ ），单位为微米（ $\mu\text{m}$ ）。
  - 黑色实线（**Black solid line**）：表示实际测量的最大强度变化。
  - 红色虚线（**Red dashed line**）：表示模拟预测的最大宽度变化。

## 主要特点（Key Features）

- 典型贝塞尔光束外观（**Typical Bessel beam appearance**）：展示了贝塞尔光束的典型外观和形状。
- 贝塞尔区可以沿光轴移动（**Bessel zone can be moved along optical axis**）：贝塞尔光束的区域可以沿光轴移动，适应不同的应用需求。
- 最大强度和宽度的变化（**Intensity in maximum and width of Bessel beam**）：贝塞尔光束的最大强度和宽度随温度变化，符合模拟预测。

## 解释（Explanation）

- 贝塞尔光束外观（**Bessel Beam Appearance**）：左侧图像展示了在不同温度下贝塞尔光束的外观，随着温度的升高，光束的形状和位置发生变化。
- 贝塞尔区移动（**Bessel Zone Movement**）：贝塞尔光束的区域可以沿光轴移动，适应不同的应用需求。
- 强度和宽度变化（**Intensity and Width Variation**）：右侧图表展示了贝塞尔光束在不同温度下的强度和宽度变化，黑色实线表示实际测量的最大强度变化，红色虚线表示模拟预测的最大宽度变化。
- 模拟预测（**Simulated Predictions**）：贝塞尔光束的强度和宽度变化符合模拟预测，确保了光束的稳定性和可控性。

通过这些图像和图表，可以清晰地了解自适应贝塞尔光束的特性和在不同温度下的变化，以及其在光学应用中的潜力。

## 椭圆形轴锥避免光束分裂 (Elliptical axicon to avoid beam splitting)

### 左侧图像 (Left Side Image)

- 椭圆镜 (Elliptical mirror)：展示了椭圆形轴锥的三维形状图，显示了其独特的光学特性。

### 右侧图像 (Right Side Images)

- 90°照明 (90° illumination)：展示了在90°照明下的光束分裂现象。
- 45°照明 (45° illumination)：展示了在45°照明下的光束分布，避免了光束分裂现象。

### 主要特点 (Key Features)

- 适用于45°照明 (Suitable for illumination under 45°)：椭圆形轴锥特别适用于45°照明，能够有效避免光束分裂。
- 长轴拉伸 $\sqrt{2}$ 倍 (Long axis stretched by  $\sqrt{2}$ )：椭圆形轴锥的长轴被拉伸了 $\sqrt{2}$ 倍，以优化光学性能。

### 解释 (Explanation)

1. 椭圆镜 (Elliptical Mirror)：左侧图像展示了椭圆形轴锥的三维形状图，显示了其独特的光学特性。椭圆形设计能够有效地控制光束的形状和分布。
2. 90°照明下的光束分裂 (Beam Splitting under 90° Illumination)：右侧上方图像展示了在90°照明下的光束分裂现象，光束被分成多个部分，影响光学性能。
3. 45°照明下的光束分布 (Beam Distribution under 45° Illumination)：右侧下方图像展示了在45°照明下的光束分布，光束保持完整，避免了光束分裂现象。
4. 适用于45°照明 (Suitable for 45° Illumination)：椭圆形轴锥特别适用于45°照明，能够有效避免光束分裂，确保光束的稳定性和一致性。
5. 长轴拉伸 $\sqrt{2}$ 倍 (Long Axis Stretched by  $\sqrt{2}$ )：椭圆形轴锥的长轴被拉伸了 $\sqrt{2}$ 倍，以优化光学性能，确保光束的形状和分布符合预期。

通过这些图像和特点，可以清晰地了解椭圆形轴锥在避免光束分裂方面的优势，以及其在不同照明条件下的光学性能。

# 螺旋相位板 - 调谐轨道角动量 (Spiral phase plate – tuned orbital momentum)

## 主要特点 (Key Features)

- 转动的相位前 (Turned phase front)：螺旋相位板能够转动相位前，改变光束的相位分布。
- 拓扑阶数调谐 (Tuning of topological order)：可以调谐光束的拓扑阶数，改变其轨道角动量。
- 可能的应用 (Possible applications)：包括光镊 (optical tweezers)、激光结构化 (laser structuring) 等。
- 反射设计 (Reflective design)：螺旋相位板采用反射设计，兼容飞秒激光 (femto second lasers)。

## 图示说明 (Illustration Explanation)

- 三维形状图 (3D Shape Image)：右上角展示了螺旋相位板的三维形状图，显示了其独特的相位分布。
- 光束图像 (Beam Images)：右侧中部展示了不同条件下的光束图像，显示了螺旋相位板对光束的调制效果。
- 强度分布图 (Intensity Distribution Images)：右侧下部展示了光束在不同温度下的强度分布图，帮助理解其光学性能。

## 左下图表 (Bottom Left Graph)

- 光束强度 (Beam Intensity)：展示了在不同位置 ( $z_1 = 350\text{ mm}$ ,  $z_2 = 620\text{ mm}$ ,  $z_3 = 750\text{ mm}$ ) 下光束的强度分布。
  - 横轴 (X-axis)：时间差 ( $\Delta t$ )，单位为飞秒 (fs)。
  - 纵轴 (Y-axis)：二次谐波强度 ( $I_{\text{SHG}}$ )，单位为任意单位 (a.u.)。
  - 不同颜色的曲线 (Different Colored Curves)：表示在不同位置下的光束强度分布。

## 解释 (Explanation)

1. 转动的相位前 (Turned Phase Front)：螺旋相位板能够转动相位前，改变光束的相位分布，从而调谐光束的轨道角动量。
2. 拓扑阶数调谐 (Tuning of Topological Order)：通过调谐光束的拓扑阶数，可以改变其轨道角动量，适应不同的应用需求。
3. 可能的应用 (Possible Applications)：螺旋相位板可以应用于光镊和激光结构化等领域，提供精确的光学控制。

4. 反射设计（**Reflective Design**）：螺旋相位板采用反射设计，兼容飞秒激光，确保高效的光学性能。
5. 光束强度分布（**Beam Intensity Distribution**）：左下图表展示了在不同位置下光束的强度分布，帮助理解螺旋相位板对光束的调制效果。

通过这些特点和图示，可以清晰地了解螺旋相位板在调谐轨道角动量方面的优势，以及其在光学应用中的潜力。

## P51

### 真正任意：艾里光束镜（5阶伯恩斯坦多项式）（**Really arbitrary: Airy beam mirror (5th order Bernstein polynomial)**）

#### 左侧图表（**Left Side Graphs**）

- 模具轮廓（**Mold Profile**）：
  - 横轴（**X-axis**）：位置（ $x$ ），单位为毫米（mm）。
  - 纵轴（**Y-axis**）：模具轮廓（Mold profile），单位为微米（ $\mu\text{m}$ ）。
  - 蓝色实线（**Blue solid line**）：表示制造的模具轮廓。
  - 黑色虚线（**Black dashed line**）：表示模拟的模具轮廓。
- 镜片轮廓（**Mirror Profile**）：
  - 横轴（**X-axis**）：位置（ $x$ ），单位为毫米（mm）。
  - 纵轴（**Y-axis**）：镜片轮廓（Mirror profile），单位为微米（ $\mu\text{m}$ ）。
  - 绿色实线（**Green solid line**）：表示目标镜片轮廓。
  - 红色实线（**Red solid line**）：表示模拟的镜片轮廓。
  - 蓝色实线（**Blue solid line**）：表示制造的镜片轮廓。

#### 右侧图表（**Right Side Graph**）

- 镜片轮廓随温度变化（**Mirror Profile with Temperature Variation**）：
  - 横轴（**X-axis**）：位置（ $x$ ），单位为毫米（mm）。
  - 纵轴左侧（**Y-axis left side**）：镜片轮廓（Mirror profile），单位为微米（ $\mu\text{m}$ ）。
  - 纵轴右侧（**Y-axis right side**）：深度（Depth），单位为微米（ $\mu\text{m}$ ）。
  - 不同颜色的曲线（**Different Colored Curves**）：表示在不同温度下的镜片轮廓变化。
  - 红色虚线（**Red dashed line**）：表示最大深度（Maximum depth）。
- 温度变化下的镜片图像（**Mirror Images with Temperature Variation**）：
  - **a到e**：表示在不同温度下的镜片图像，显示了镜片轮廓的变化。

## 主要特点（Key Features）

- **模具轮廓（Mold Profile）**：左上图展示了制造的模具轮廓与模拟轮廓的对比，确保模具的精确性。
- **镜片轮廓（Mirror Profile）**：左下图展示了目标镜片轮廓、模拟轮廓和制造轮廓的对比，确保镜片的精确性。
- **温度变化下的镜片轮廓（Mirror Profile with Temperature Variation）**：右上图展示了不同温度下镜片轮廓的变化，帮助理解温度对镜片形状的影响。
- **温度变化下的镜片图像（Mirror Images with Temperature Variation）**：右下图展示了不同温度下的镜片图像，显示了镜片轮廓的变化。

## 解释（Explanation）

1. **模具轮廓（Mold Profile）**：左上图展示了制造的模具轮廓与模拟轮廓的对比，确保模具的精确性和一致性。
2. **镜片轮廓（Mirror Profile）**：左下图展示了目标镜片轮廓、模拟轮廓和制造轮廓的对比，确保镜片的精确性和一致性。
3. **温度变化下的镜片轮廓（Mirror Profile with Temperature Variation）**：右上图展示了不同温度下镜片轮廓的变化，帮助理解温度对镜片形状的影响。随着温度的升高，镜片的深度逐渐增加。
4. **温度变化下的镜片图像（Mirror Images with Temperature Variation）**：右下图展示了不同温度下的镜片图像，显示了镜片轮廓的变化，帮助理解温度对镜片形状的影响。

通过这些图表和图像，可以清晰地了解艾里光束镜在不同温度下的形状变化，以及其制造过程中的精确性和一致性。