

第三章 材料高通量制备技术（一）

一、组合材料芯片技术

二、分立模板法

三、共沉积法

四、连续模板法

五、薄膜样品的高通量成相方法

六、其他高通量制备技术

薄膜材料高通量制备技术

➤ 步骤：

（1）组合（高通量薄膜制备）

将多个元素系统性地混合，以获得所需的材料成分“组合”

（2）成相（高通量薄膜制备）

通过扩散或者热力学过程形成晶相或非晶相材料，即“成相”

组合材料芯片技术

- 20世纪90年代中期，受到集成电路芯片和生物基因芯片技术的启发，项晓东和Schultz及其团队成员在美国劳伦斯伯克利国家实验室发展出一套较为成熟的组合材料芯片制备方法。
- 该方法可实现在一块较小的基底上，通过精妙设计，以任意元素为基本单元，组合集成多达 $10^7 \sim 10^8$ 种不同成分、结构、物相等材料样品库，并利用高通量表征方法快速获得材料的成分、结构、性能等信息，以实验通量的大幅度提高带来研究效率的根本转变，实现材料搜索的“多、快、好、省”。



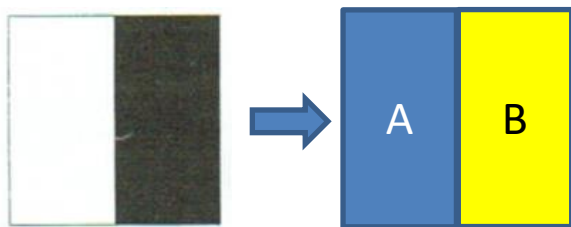
组合材料芯片技术

核心特征包括：

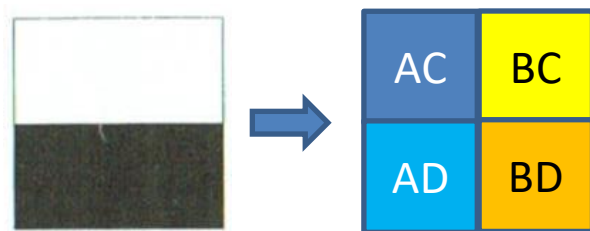
- 1) 通过精妙的材料芯片设计，在同一基片上、在相同或不同的热力学参数下一次性地合成覆盖大范围组分或整个二元/三元“相图”组分的样品，降低由多次实验所带来的数据离散性；（高通量制备）
- 2) 利用自动化、高速度、综合性微区表征平台的强大分析测试能力，对样品进行多参数微区分析表征，建立完整周密的数据库；（高通量表征）
- 3) 采用科学的数据统计分析方法，找出大量数据中隐含的趋势与规律。（大数据技术及数据挖掘）

分立模板法

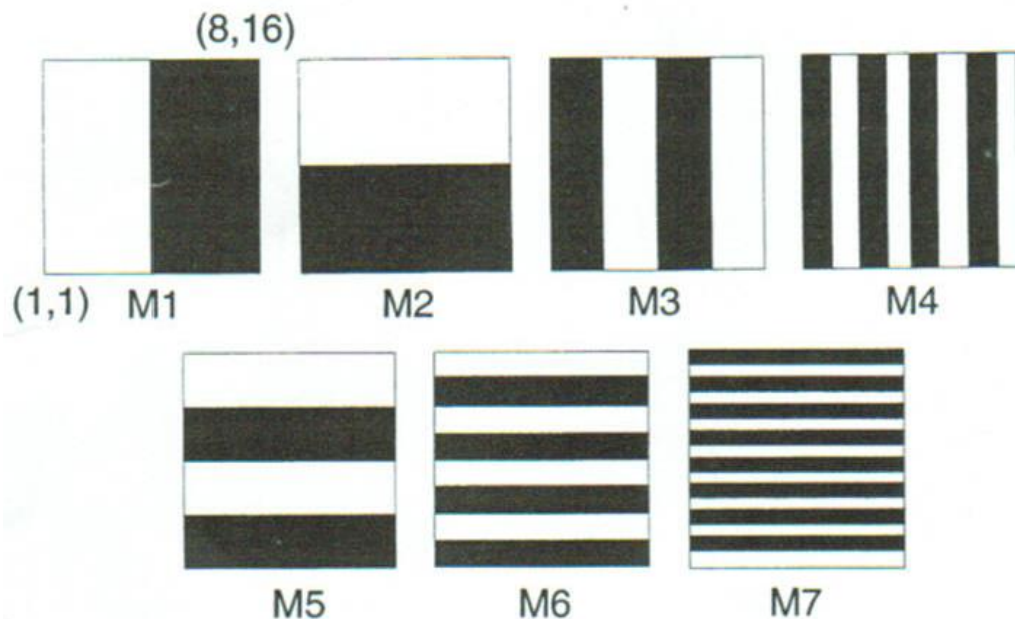
第一层：



第二层：



第三层：.....



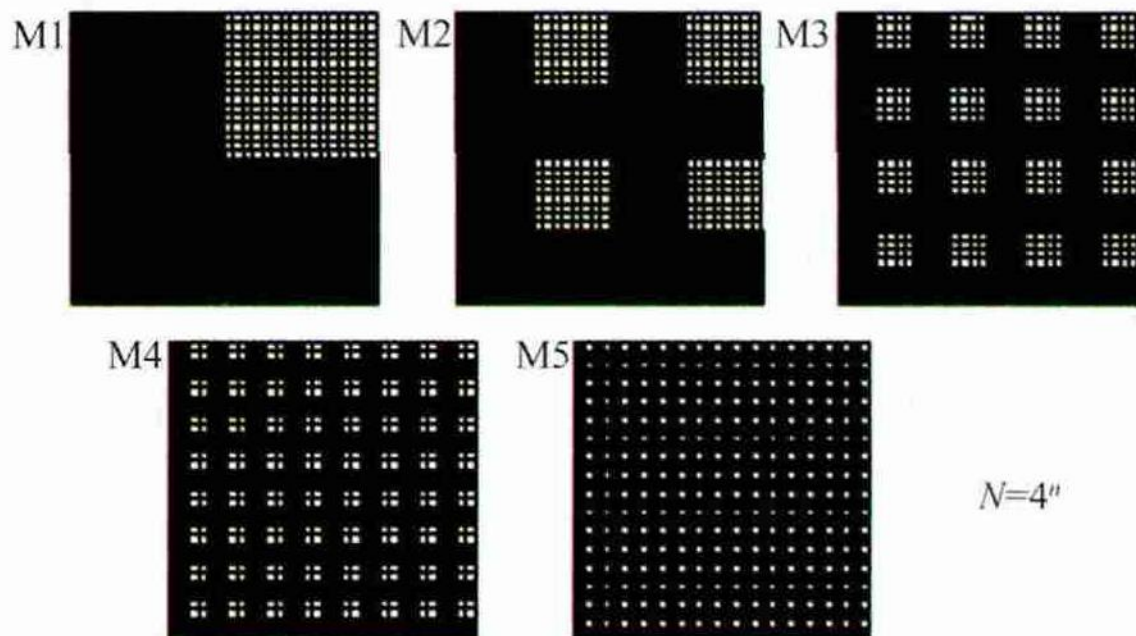
二元分立模板

样品数=第一层模板分格数目×第二层模板分格数目=2×2=4

分立模板法

特点：

- 在镀膜均匀的前提下，该方法可获得任意成分分布，不受组元数目限制
- 成分分布完全可控
- 成分覆盖跨度大
- 各分立区域成分均匀



四元分立模板

适用于大通量、多元素的新型材料海选。

分立模板法

超导材料



分立模板法

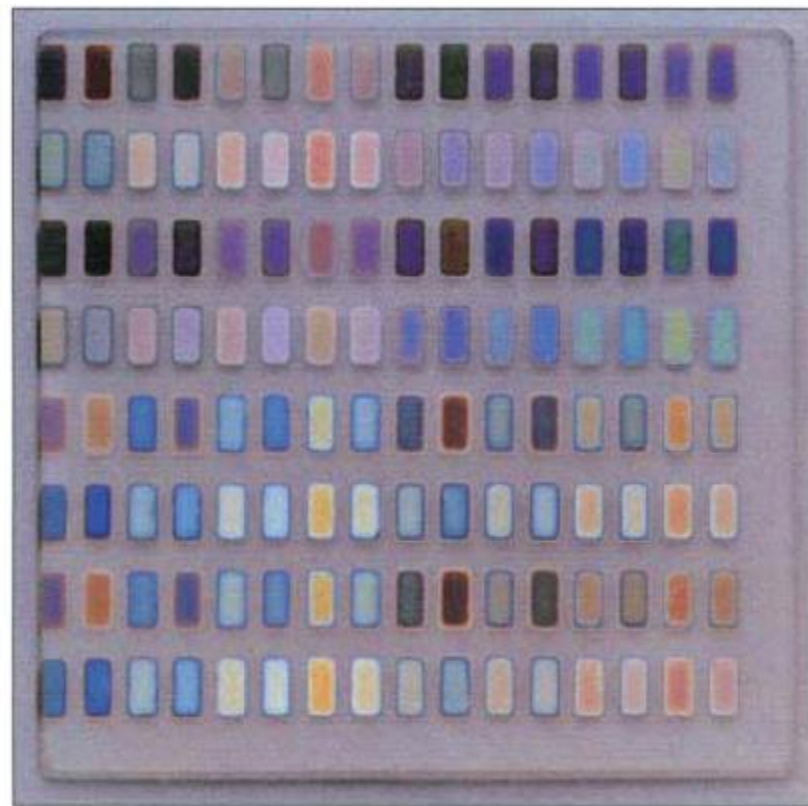
超导材料

- 功能特性：零电阻和抗磁性
- 目前，常压下具有超导电性的纯金属有32种；
- 具有超导电性的合金和化合物多达几千种，但多数不能应用；
- 具有应用前景的高温超导材料往往是多元复杂氧化物或砷化物，其复杂性使得其研发工作耗时费力。

分立模板法

超导材料

项晓东等在美国劳伦斯伯克利国家实验室利用磁控溅射+分立式掩模，用 BaCO_3 、 Bi_2O_3 、 CaO 、 CuO 、 PbO 、 SrCO_3 、 YO_3 靶材在单一基底上沉积得到128个不同组分的固态薄膜样品，每个样品尺寸为 $1\text{ mm} \times 2\text{ mm}$

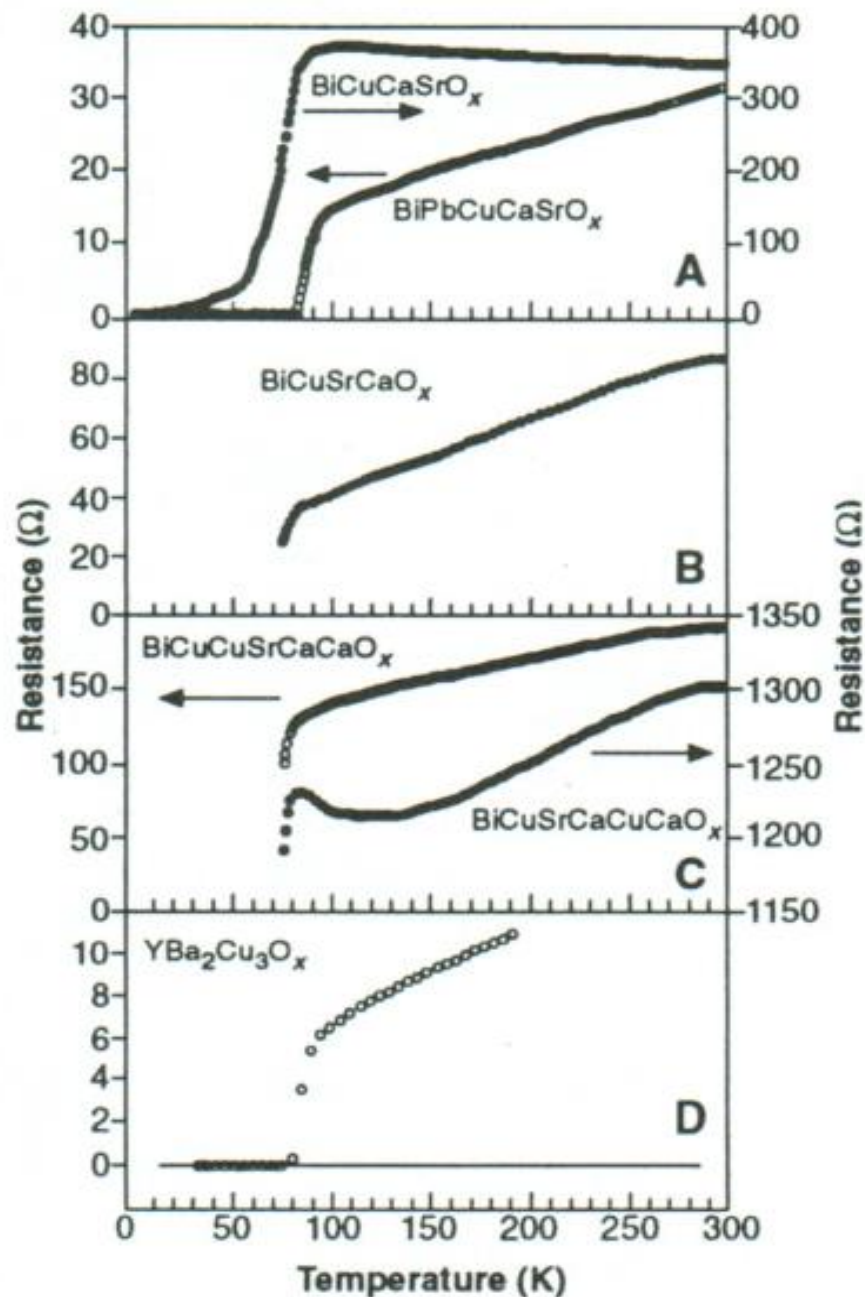


烧结前的128个样品阵列

分立模板法

超导材料

- 将样品库在840°C热处理
- 快速测量不同温度下每一个样品的电阻。
- 在一次实验中找到前人经过多年研究发现的 BaSiCaCuO_x 和 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 两种超导材料，实现了复杂材料体系的快速筛选。

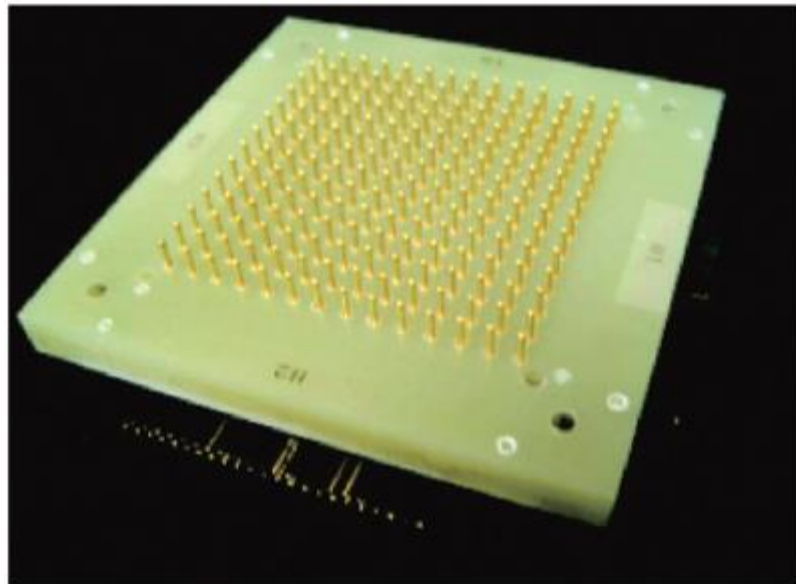


分立模板法

超导材料

为满足超导材料组合材料芯片高通量并行测试需求，美国布鲁克海文国家实验室的 Bozovi 以及加拿大戴尔豪斯大学的 Hewitt 等分别开发了并行四探针电阻-温度测试方法并应用于新型超导材料的筛选工作。

Hewitt 等开发的并行四探针电阻-温度测试方法使用的196个探针阵列，利用这种并行探针可以同步测量49个样品的电阻-温度曲线

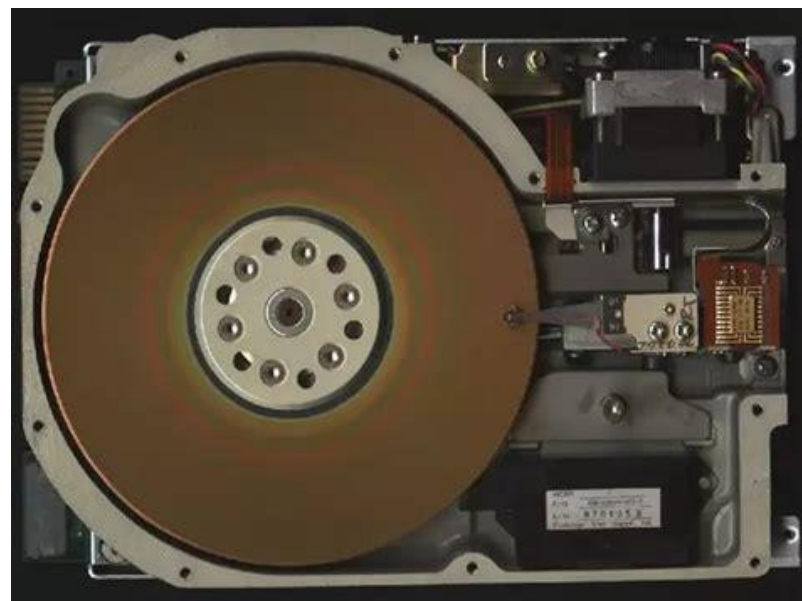


探针之间最短距离为 4.64 mm

分立模板法

巨磁阻材料

- 物质在一定外磁场作用下电阻改变的现象称为“磁阻效应”。
通常情况下，大多数物质的磁阻变化较小，但对于 $\text{La}_{0.60}\text{Y}_{0.70}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_x$ 等锰基磁性材料，其磁阻在外磁场作用下会有数量级的巨大变化，这一类材料因而被称为巨磁阻材料。
- 巨磁阻材料往往是多元复杂化合物，采用传统方法研究效率低下。

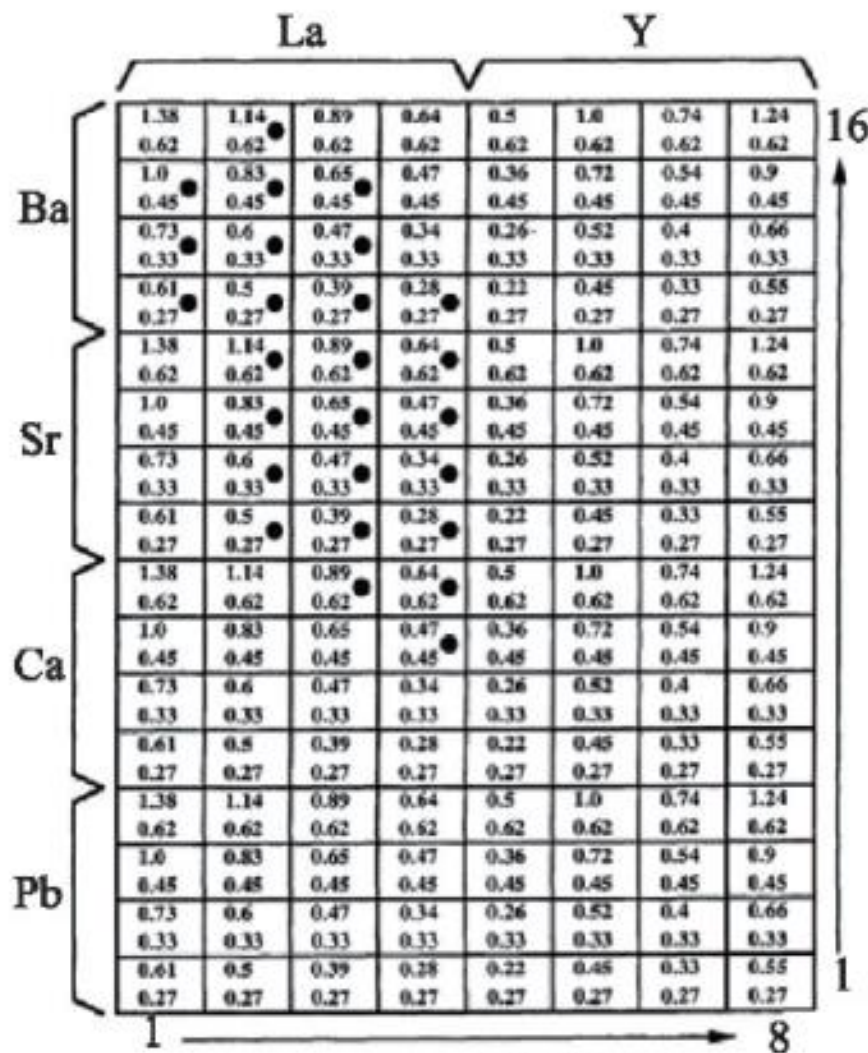


分立模板法

巨磁阻材料

Briceno 等采用射频磁控溅射+分立掩模的方法在

LaAlO₃基底上制备了含有
128 个样品单元的 Co 基氧
化物巨磁阻材料样品库。



(a) $\text{La}_x\text{M}_y\text{CoO}_z$ 材料样品库

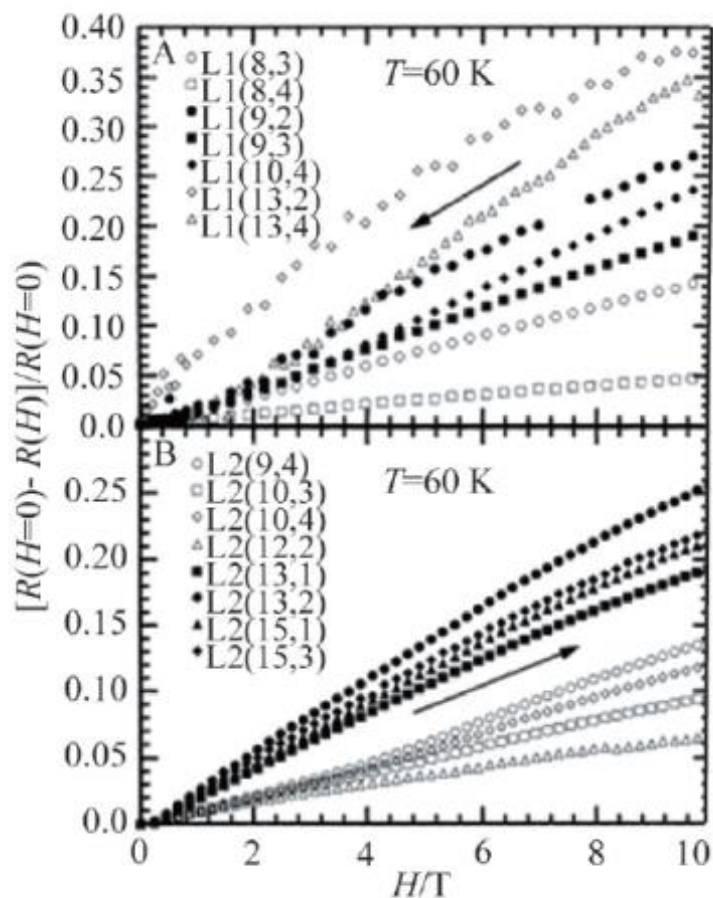
分立模板法

巨磁阻材料

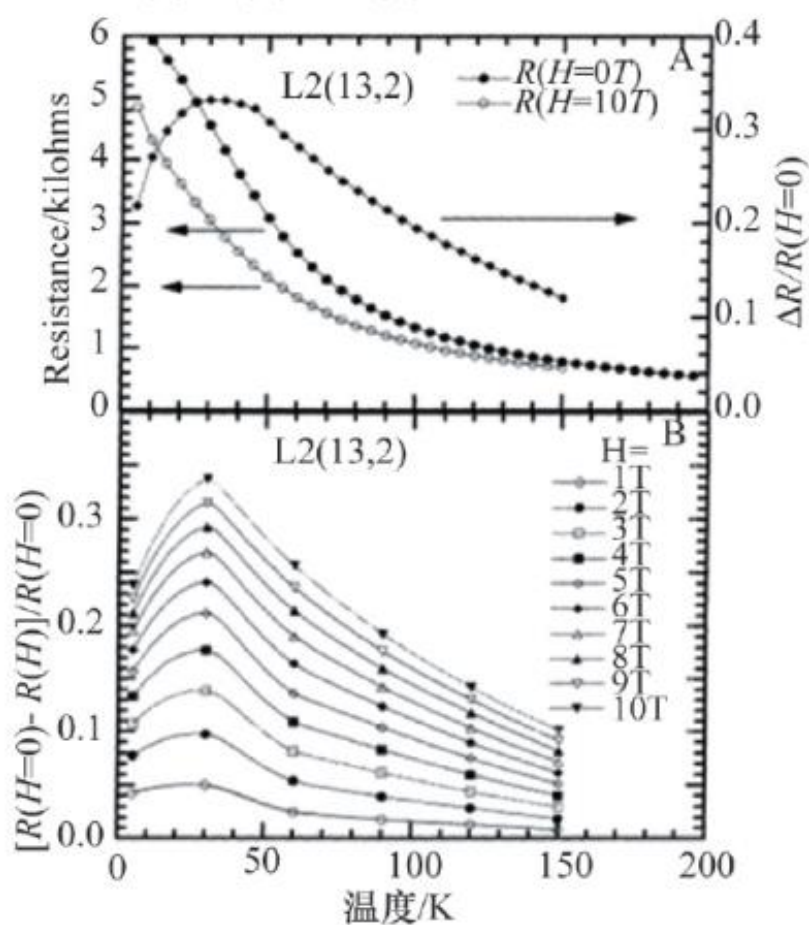
- 以 La_2O_3 、 Y_2O_3 、 BaCo_3 、 SrCo_3 、 CaO 、 Co 靶材为溅射源，使用分立掩模的方法完成元素种类和化学配比不同的薄膜前驱体的沉积。
- 然后经过不同的热处理工艺制得 $\text{Ln}_x\text{M}_y\text{CoO}_z$ 材料样品库
(其中 $\text{Ln}=\text{Y}$ 或 La ， $\text{M}=\text{Pb}$ 、 Ca 、 Sr 或 Ba)
- 测量样品在不同温度 and 不同磁场强度下的磁阻率。

分立模板法

巨磁阻材料



(b) L1(A)和L2(B)磁阻率与磁场关系



(c) L2(13,2)在不同外磁场条件下磁阻率与温度关系

分立模板法

巨磁阻材料

- ✓ 在 $\text{La}_x(\text{Ba}, \text{Sr}, \text{Ca})_y\text{CoO}_z$ 样品中发现了明显的巨磁阻效应，而在 $\text{Y}_x(\text{Ba}, \text{Sr}, \text{Ca})_y\text{CoO}_z$ 样品中磁阻效应相对较小。
- ✓ 成功发现了钴基巨磁阻材料，同时发现Co基材料的磁阻效应随着材料成分中碱土金属离子尺寸的增加而增加。
- ✓ 这与 Mn基材料磁阻效应随着碱土金属离子尺寸的增加而减小截然不同。

分立模板法

荧光材料

- 荧光材料能够吸收一定波长的光并立刻向外发出不同波长的光，在半导体照明、光谱转换、图像显示等领域有着广泛而重要的应用。
- 其中，无机荧光材料又以其发光纯度高和热学化学性能稳定等优点，受到广泛关注。



分立模板法

荧光材料

- 无机荧光材料组成复杂、发光机理繁多、对掺杂浓度敏感，研发难度较高。
- 许多性能优良的荧光材料多被国外公司专利垄断。
- Sun等及 Wang等采用组合材料芯片技术建立了包含上千种不同组分、固相或液相的无机荧光材料库，并探寻荧光效率与元素组分之间的关联性。

分立模板法

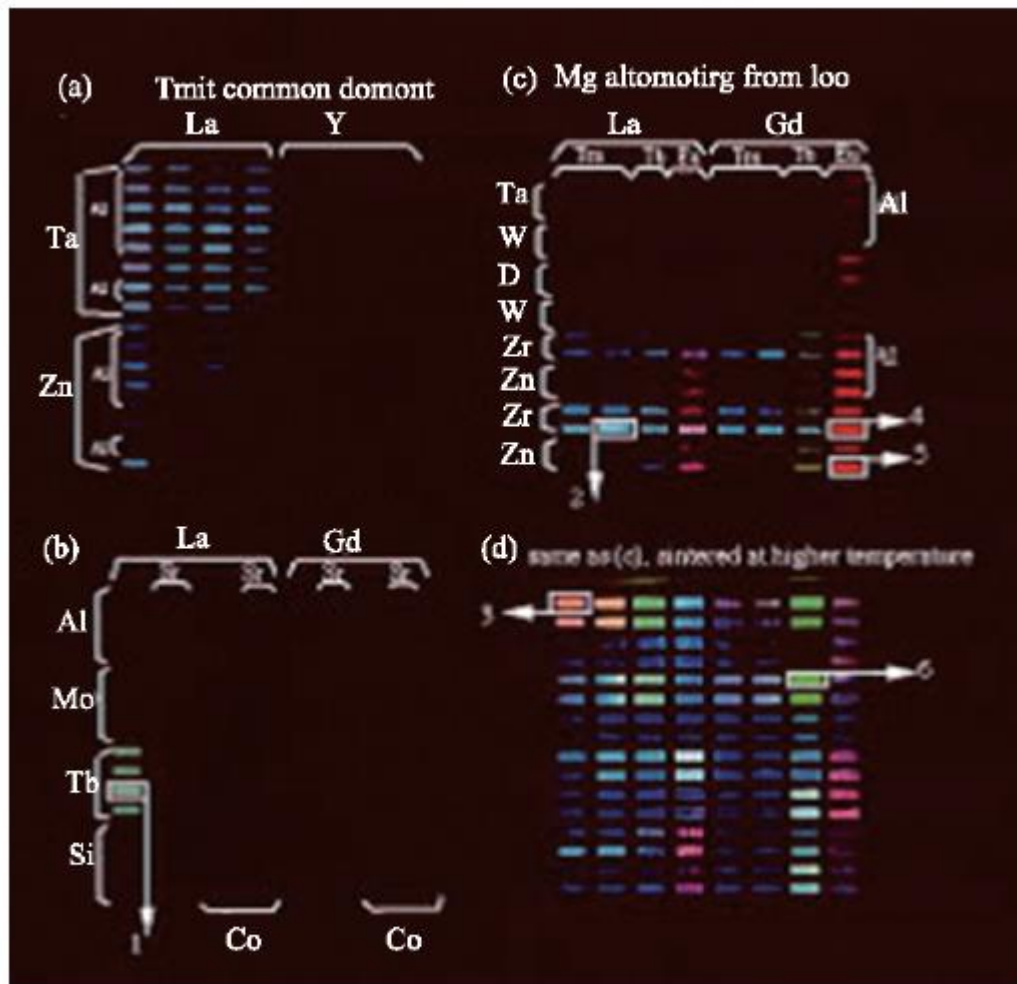
荧光材料

- Sun 和 Xiang 在 6.45 cm^2 的 $\text{LaAlO}_3(100)$ 单晶基底上组合溅射了 128 种不同组分的薄膜化合物样品库；
- 用 X 射线衍射方法 (XRD) 测定样品成分和结构；
- 用分光光度计测定样品的荧光吸收和荧光发射光谱，并与 $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$ 的吸收和发射光谱进行对比

分立模板法

荧光材料

- 采用光电倍增管探测器测定荧光的纯度，并用该探测器测试了不同波长的激发光（580~720 nm）和所对应荧光的强度，计算得到各组分的量子效率

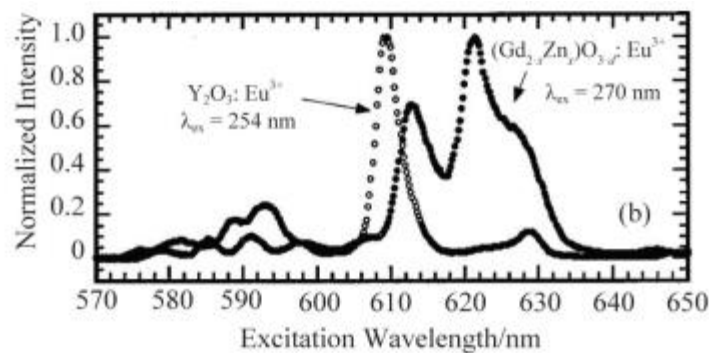
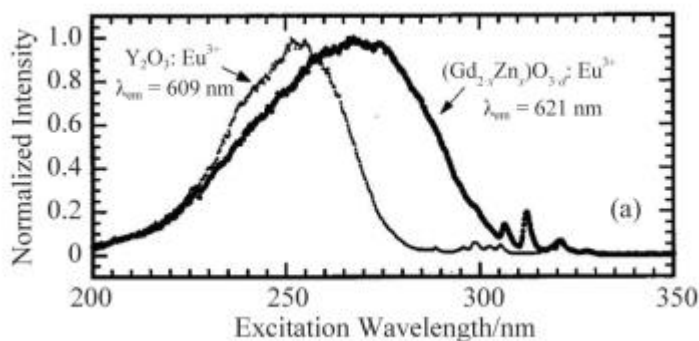


荧光材料在不同组分下的发光情况

分立模板法

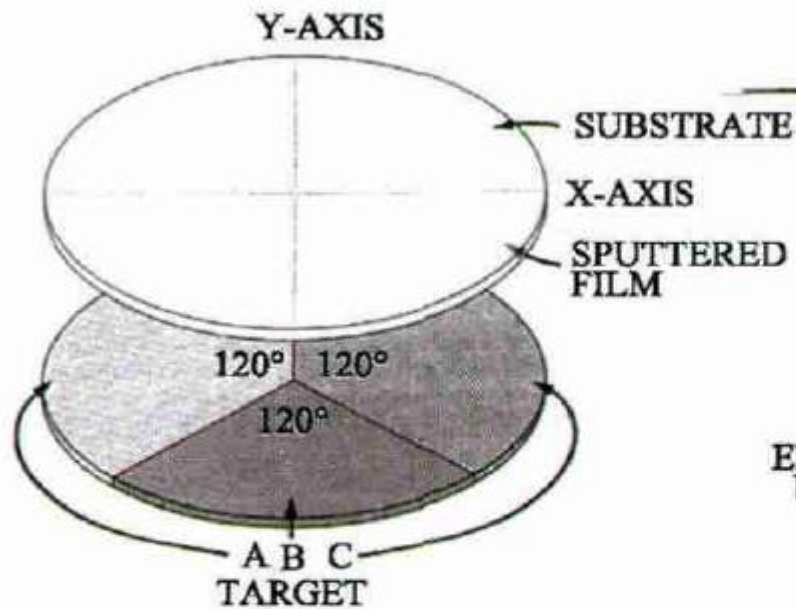
荧光材料

- ✓ 分析了光谱结果和量子效率，找到了量子效率与商业化产品 $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$ 荧光粉相当，但发光纯度优于 $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$ 的 $(\text{Gd}_{1.54}\text{Zn}_{0.46})\text{O}_{3-d}:\text{Eu}_{0.06}$ 荧光粉。
- ✓ 这是自 $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$ 出现数十年后，首次发现性能更好的荧光材料

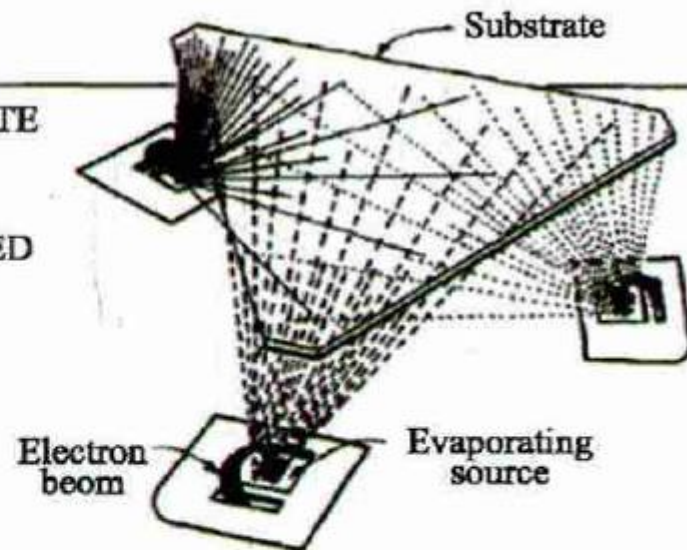


$(\text{Gd}_{1.54}\text{Zn}_{0.46})\text{O}_{3-d}:\text{Eu}_{0.06}$ 与 $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$ 吸收和发射谱对比

共沉积法



(a) 共溅射制备材料成分
“组合”示意



(b) 共蒸发制备材料成分
“组合”示意

共沉积薄膜法示意

共沉积法

特点：

- 利用不同沉积源与基片的相对角度和位置，同时将多种成分沉积在一块基片上，形成组分呈连续渐变式梯度分布的多元样品，
- 无需使用任何掩模即可获得连续成分分布，且与薄膜沉积的厚度控制无关，成分分辨率可达0.1%~1.0%，沉积工艺后无需热处理即可获得各元素充分混合的元素组合样品。

不足：

- 在三元以上的体系中难以实施；
- 用于多元材料系统研究时不易实现0~X%的成分分布
- 各沉积源的产额不均匀，成分分布可控性较弱。

连续模板法

利用随时间移动的掩模与镀膜技术形成组分呈连续渐变式梯度分布的多元化合物样品。

特点：

- 在镀膜均匀前提下不必了解沉积分布曲线，无需使用复杂模板，使成分分布完全可控。该方法可获得0~X%的连续线性梯度的成分分布
- 连续模板镀膜法适用于系统性的材料相图研究

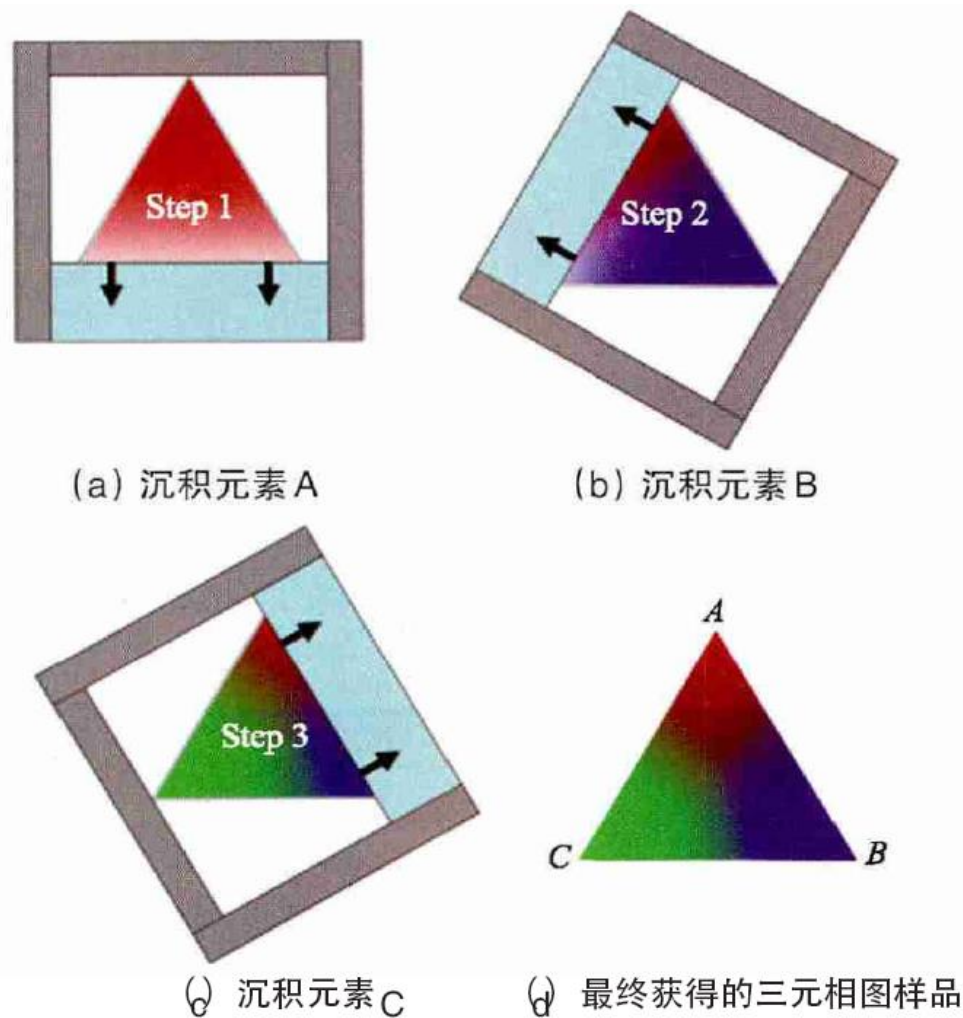


图9 连续相图模板镀膜法制备三元相图样品的工艺过程和

$A_xB_yC_z$ 样品示意

共沉积法

非晶材料

- 非晶态合金通常是指合金从液态（或气态）急速冷却时，因来不及结晶而在室温或低温条件下保留液态（或气态）原子无序排列的凝聚状态，也被称为“金属玻璃”或“玻璃态合金”。
- 非晶态合金凭借其长程无序、短程有序的结构，优异的磁学性能、耐蚀性、耐磨性，高的强度、硬度和韧性，高的电阻率，易加工等特性，成为电力、电子、计算机、通信等高新技术领域的关键材料。



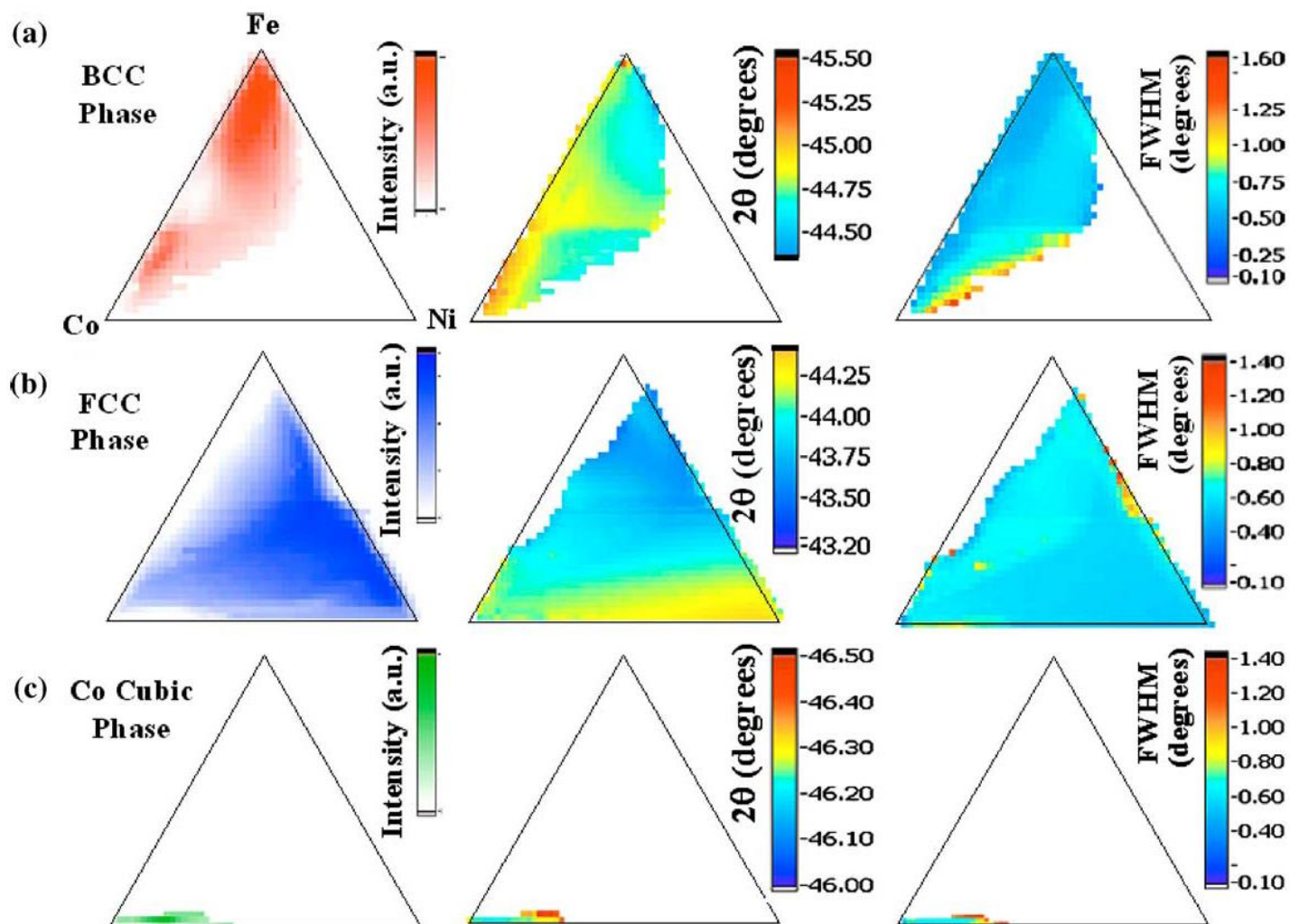
共沉积法

非晶材料

- 在非晶态合金制备过程中，对冷却速率的掌控极其重要，较快的临界速率更有利于非晶态的形成。由于传热速率的限制，金属合金非晶态的形成能力受制于临界冷却速率（决定了其临界尺寸），因此大尺寸非晶态合金的制备工艺条件比较苛刻。
- Yoo等将组合材料芯片技术应用于非晶态合金材料研究，以考察该技术在合金材料研究中的精确性、可靠性以及可移植性。
- Yoo等采用离子束溅射+共沉积法制备了Fe-Ni-Co三元合金连续组分芯片，利用扫描微束X射线衍射仪、扫描磁光克尔效应测量仪和扫描纳米压痕显微镜，对该合金材料芯片进行了高通量的结构分析、磁性研究以及硬度测量，并绘制了三元连续相图

共沉积法

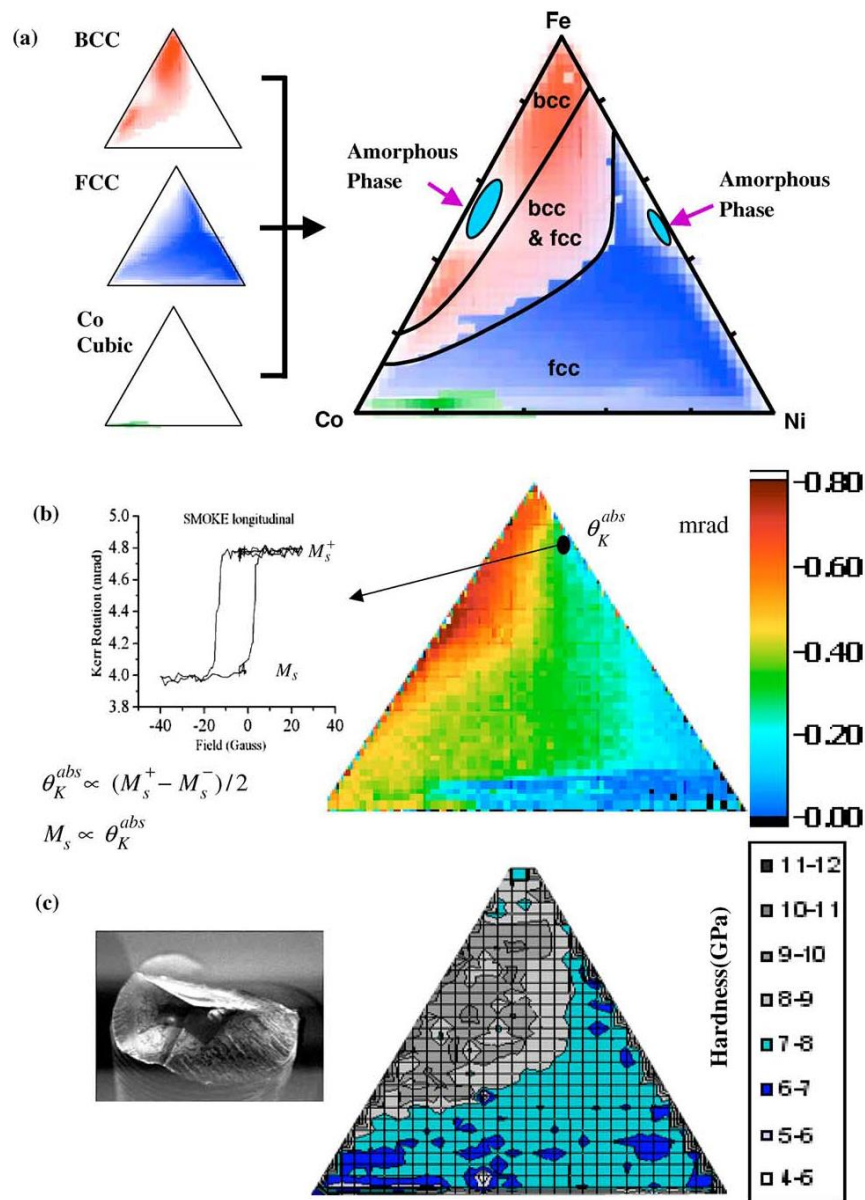
非晶材料



共沉积法

非晶材料

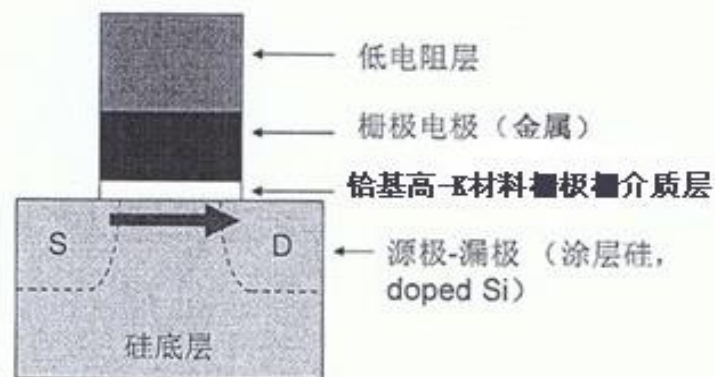
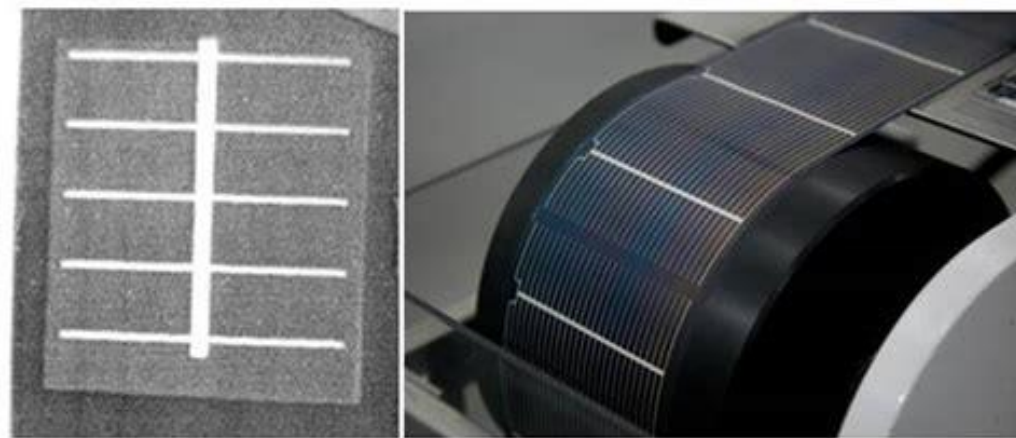
- ✓ 快速验证了文献和数据库中已有数据。
- ✓ 采用同步辐射XRD微区表征技术进行了更为精细的表征，发现了两个新的非晶相区域。



共沉积法

金属栅电极材料

- 在集成电路中，传统的栅层叠、 SiO_2 栅极电介质和单晶硅栅电极材料存在高漏电流密度、单晶硅耗尽和掺杂扩散效应等问题，逐渐被新型金属栅电极材料和高k介电材料所取代。
- 在研发新型金属栅电极的过程中，高通量组合材料芯片技术发挥了重要作用。

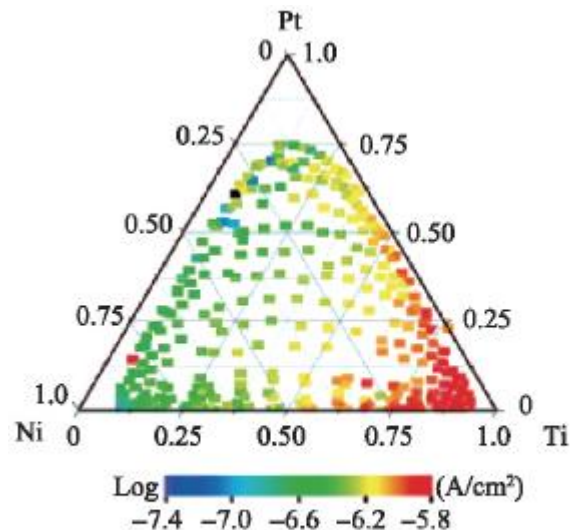


共沉积法

金属栅电极材料

➤ 2006年，美国马里兰大学的Chang等采用三靶磁控共溅射在镀有 HfO_2 的Si基底上制备了Ni-Ti-Pt三元连续组分材料样品库

(Ni: 0~90%, Ti: 0~90%, Pt: 0~75%)



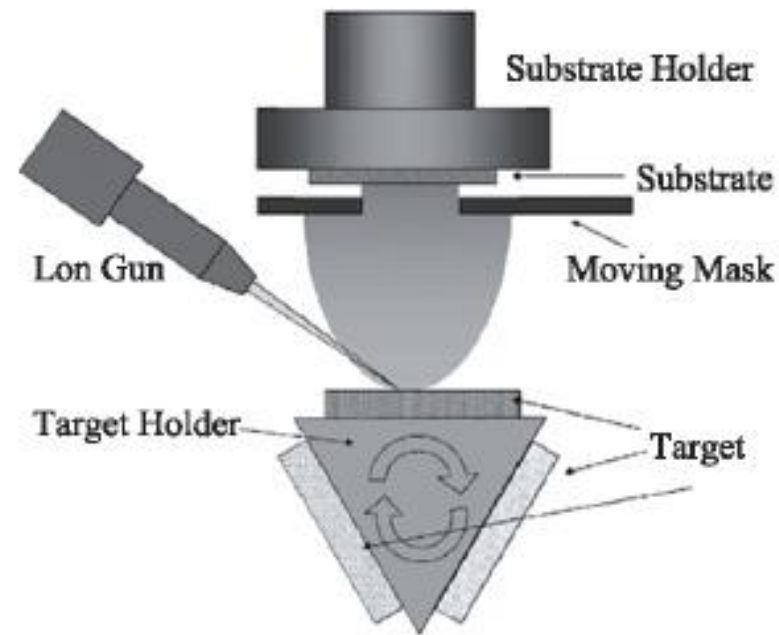
漏电流密度 J_L 分布图 (基片上加 1 V DC 偏压)

- 通过波谱仪、微束X射线衍射、C-V和I-V等分析方法系统地研究了三元样品库的电学性能
- 发现平带电压与Ti含量成反比，且最小平带电压-0.8 V为含Ti最多的样品；富Ti区域的漏电流密度最大 ($\log J_L \sim -5.8 \text{ A/cm}^2$)，富Ni 和富Pt 区域的漏电流密度最小 ($\log J_L \sim -7.4 \text{ A/cm}^2$)，
- 机理分析：富Ti区域功函数更小，而富Ni和富Pt区域功函数更大。

连续模板法

金属栅电极材料

2004年以来，日本国家材料科学研究所Ahmet等发展了一套栅电极组合材料芯片制备系统，在 5×10^{-8} Pa条件下采用离子束溅射和连续移动掩模方法在 $\text{SiO}_2(3\text{nm})/\text{Si}(100)$ 基底上制备了Pt-Ru-Nb三元材料样品库。



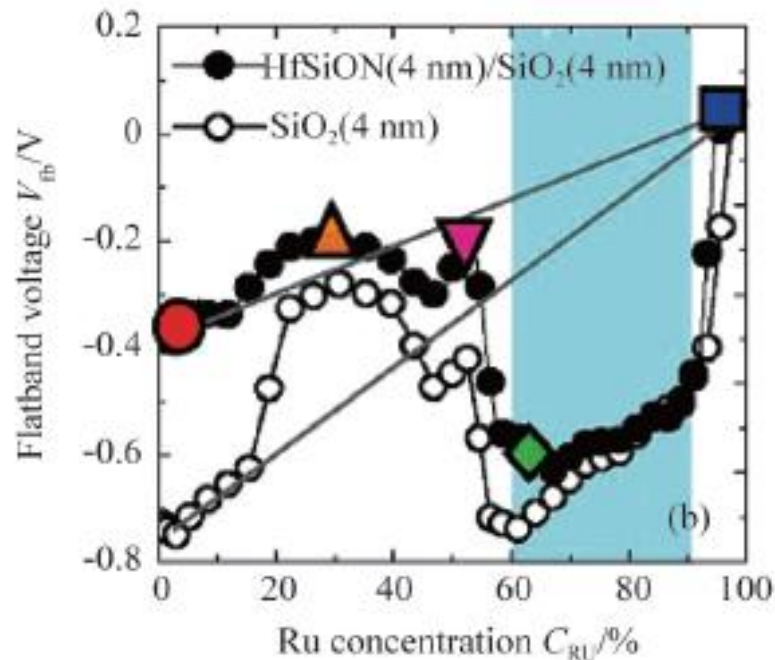
连续模板法

金属栅电极材料

➤ 2007年，日本早稻田大学的Ohmori等采用离子束溅射和连续移动掩模的方法在MOCVD制得的HfSiON基底上制备了Ru-Mo材料样品库。

➤ 在钌电极上加入10%~30%的钼可以显著调整材料的平带电压至0.6~0.8 V，这是由于Mo在金属和高k材料HfSiON界面的析出造成的。

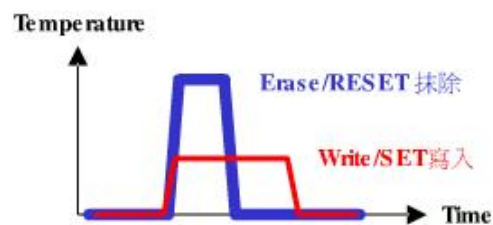
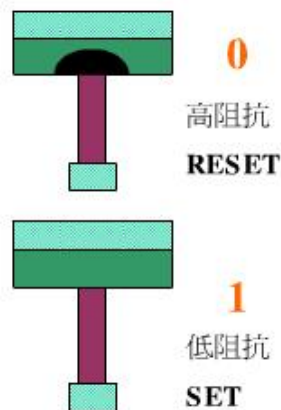
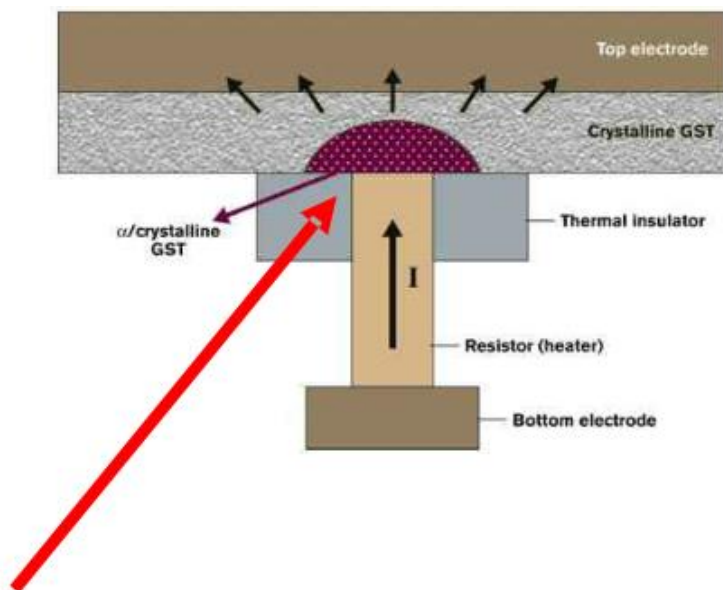
➤ 上述工作对后来Intel公司发现并应用的钨基金属栅/高k电介质具有重要的启示作用



连续模板法

固体相变存储材料

相变存储器通过相变材料晶相和非晶相之间电阻的不同以及相互之间的转变来实现数据记忆和存储，可实现高密度、低成本的三维存储器件。



连续模板法

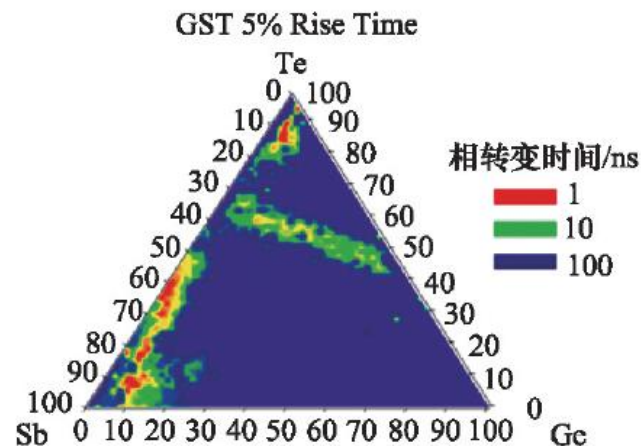
固体相变存储材料

- 2005年，项晓东研究组为了寻找性能比传统 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 合金更优的相变存储器材料，采用组合材料芯片技术研究了Ge-Sb-Te相转变时间与元素成分之间的关联性。
- 通过**连续掩模镀膜技术**，他们实现Ge、Sb、Te三种元素任意比例的混合。
- 通过脉冲激光逐点加热元素混合制备Ge-Sb-Te合金材料，并用红外成像实时监测温度变化；
- 另外一束激光对样品表面反射率进行实时监测，判断相变是否发生，并反馈控制加热激光的脉冲次数。

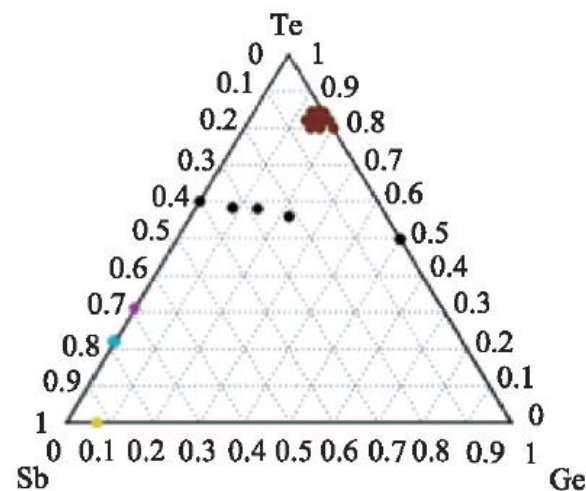
连续模板法

固体相变存储材料

- 通过上述方法，实现了原位实时的高通量的Ge-Sb-Te薄膜材料制备和表征，绘制了所示的在激光加热下相转变时间（100、10、1 ns）与元素成分关联的连续相图。
- 完成这些实验只花费2周左右的时间。去50年文献搜集的数据绘制的经典相图，而其信息量与采用组合材料芯片所绘制的连续相图相去甚远。



(a) 组合材料芯片技术绘制的连续分布图



(b) 过去50年发表的分立数据点

Ge-Sb-Te 三元合金材料相变开关时间随成分分布

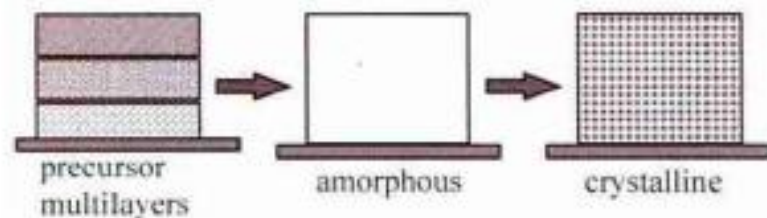
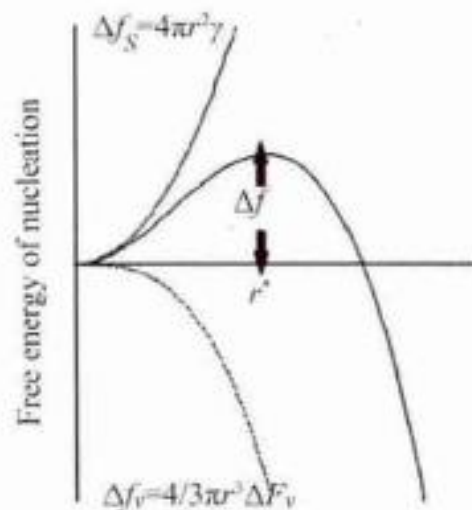
连续模板法

固体相变存储材料

从上述三元连续相图中，可以很方便地选出一些具有较低开关时间的Ge-Sb-Te材料组分区域，其中包括发现了IBM在两年后才宣布发现的Sb/Te相变存储器材料。

薄膜样品的高通量成相方法

- 薄膜法制备的组合材料样品往往由多层膜构成，膜层间可能会发生扩散与成核（结晶）两种互相竞争的热力学过程。通常成核需超越一个临界厚度（尺寸）及能量（温度），即热力学窗口，而一旦材料结晶成核便不易进一步扩散。
- 利用窗口特性，当温度低于窗口温度时，扩散占优势，多层膜首先扩散形成非晶态混合体，当温度提高到窗口温度以上后，才能成核结晶。

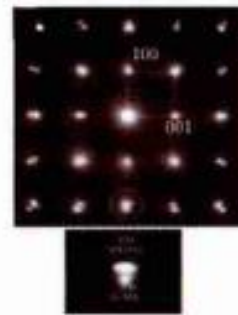
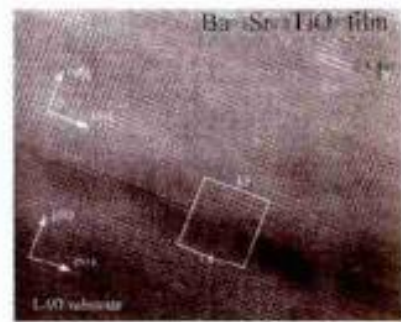
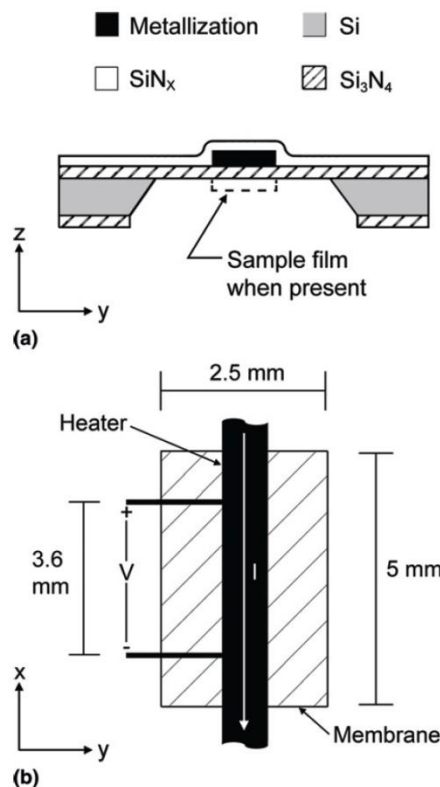


(a) 利用“层厚/温度”热力学窗口可让多层膜首先扩散形成非晶态混合体，然后再成核结晶

薄膜样品的高通量成相方法

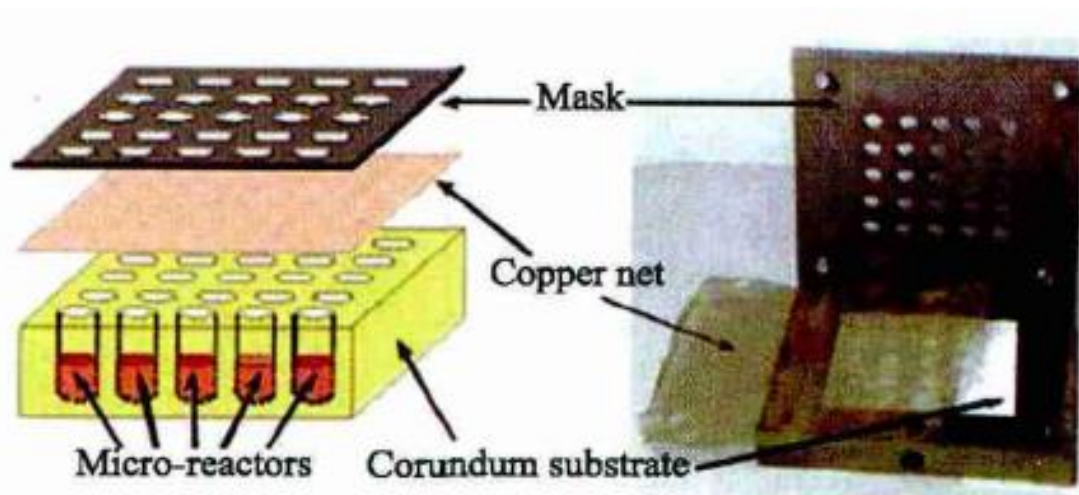
在实际操作中，热过程分为**平行法**和**分立法**两种。

- 平行法是指组合材料样品上各点被置于相同的加热过程；
- 分立法是指组合材料样品上各点被置于不同的加热过程。
- 组合材料芯片扩散一般采用平行法，成晶可根据需要采用分立法或平行法。



(b) 利用平行法生长高质量的钛酸锶钡外延薄膜

薄膜样品的高通量成相方法



(a) 微反应器阵列及网版掩模

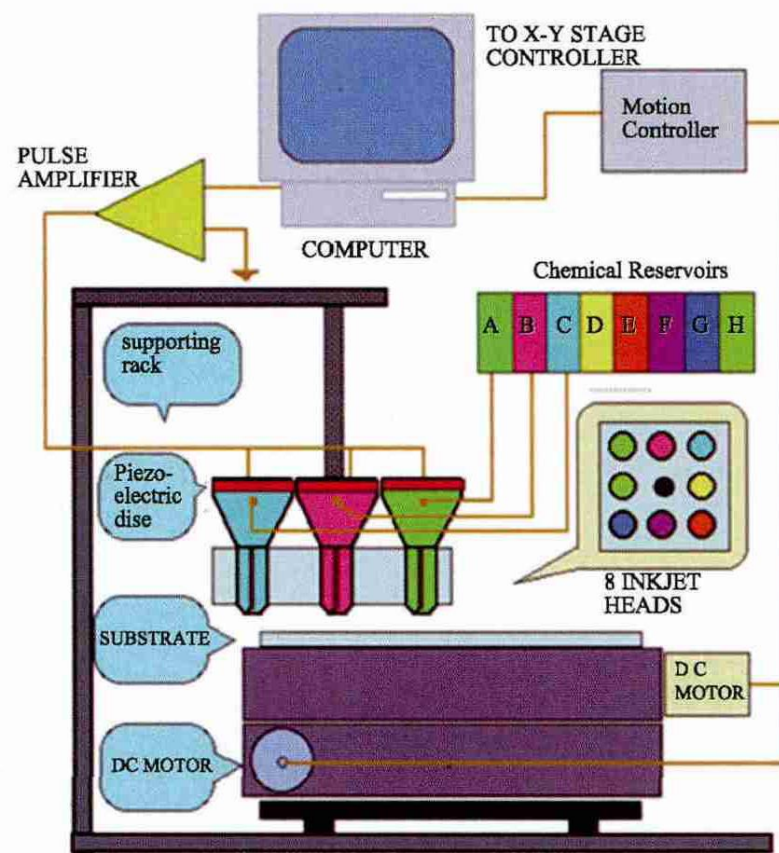


(b) 将成相后的样品转移至一浅槽基底便于表征
阵列燃烧成相微反应器示意

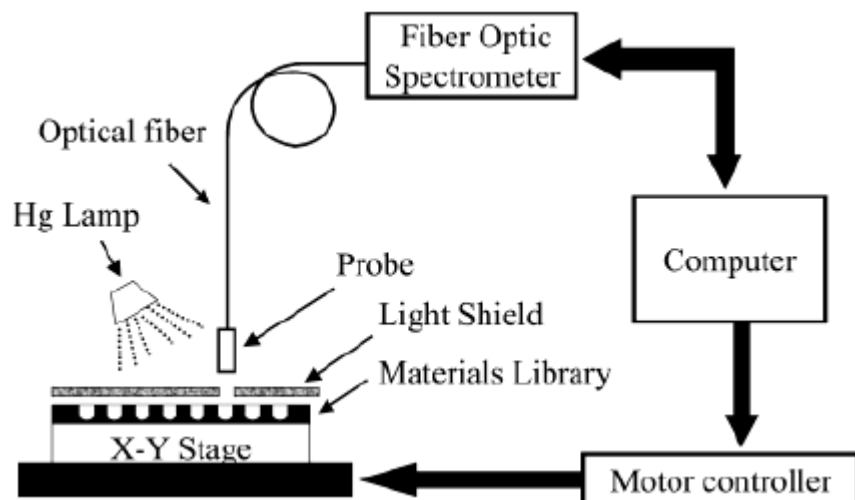
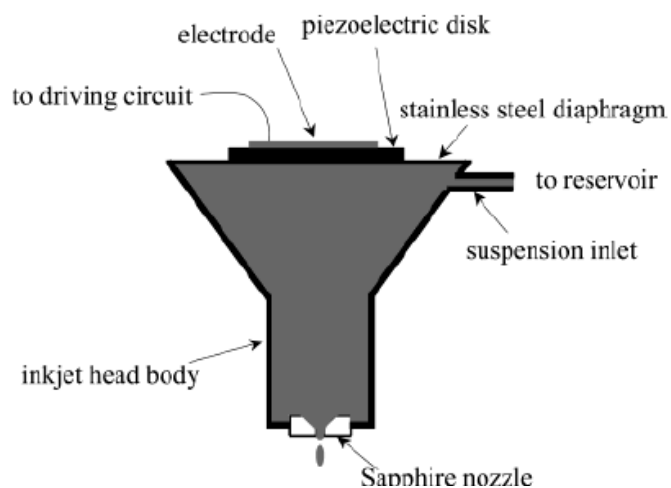
“喷印”合成法

利用液相（如喷墨）或固相（如等离子或激光喷涂）喷射技术制备二维或三维组合材料样品，实现多组分快速递送（2000 微滴/s），分子水平混合（液相）。

- 高精度度及可重复性；
- 适用于多种有机、无机结构和功能材料；
- 空间密度可达90000 样品/英寸²（分辨率300dpi）。

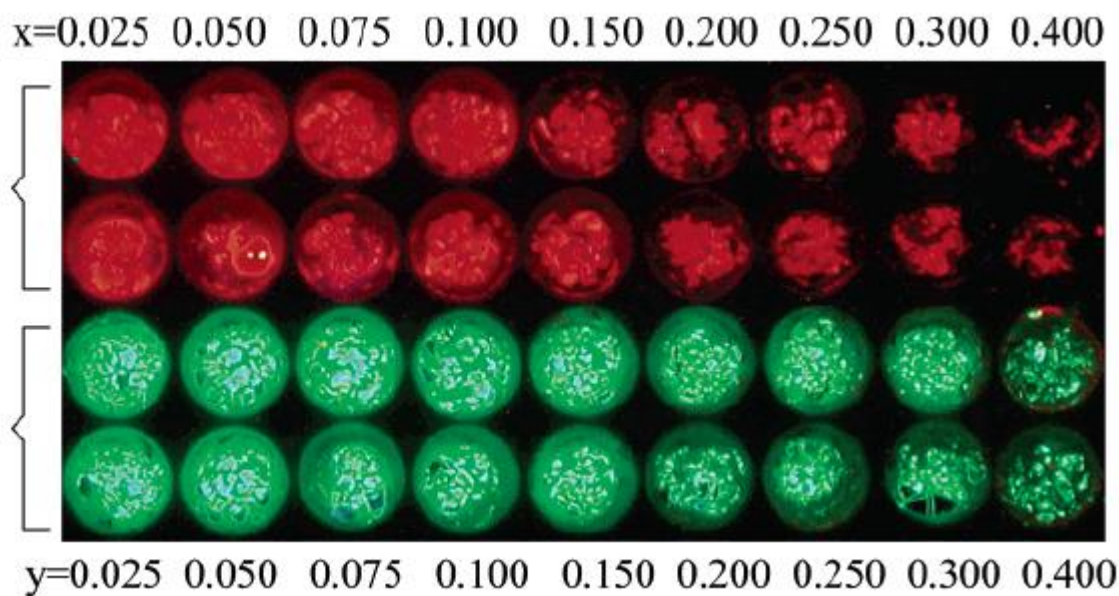


“喷印”合成法



荧光材料 $\text{Y}_2\text{O}_3: \text{Eu}^{3+}_x$

$\text{Y}_2\text{O}_3: \text{Tb}^{3+}_y$



“喷印”合成法

催化材料

- 制备8组元“墨水”；
- 样品库组合；
- “成相”

10⁷个配方/小时

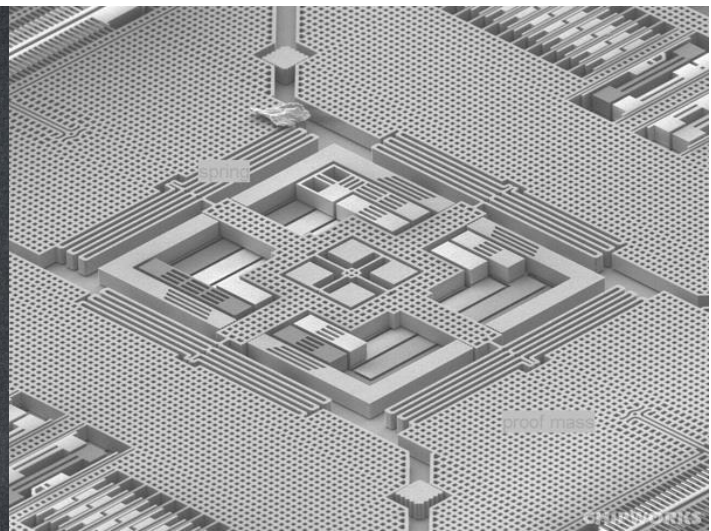
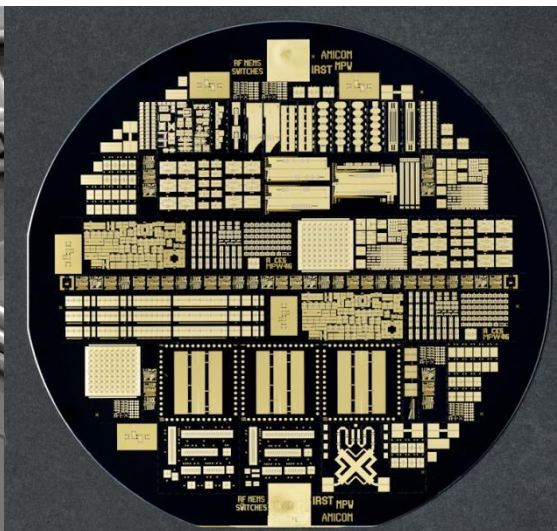
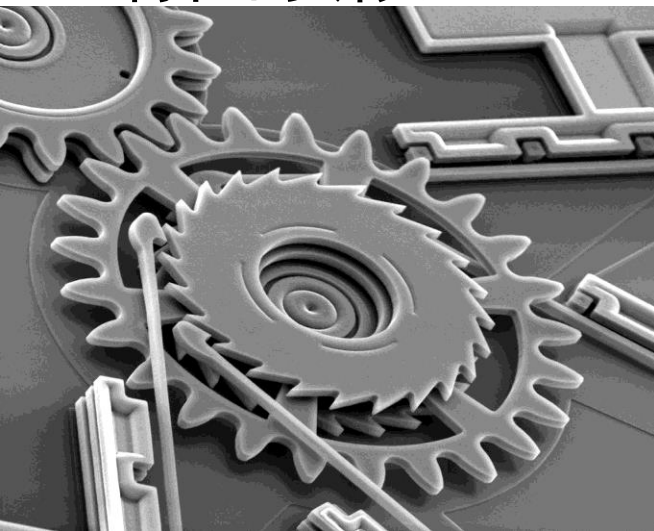
比传统研究方法效率提高25,000倍



微机电技术

非晶材料

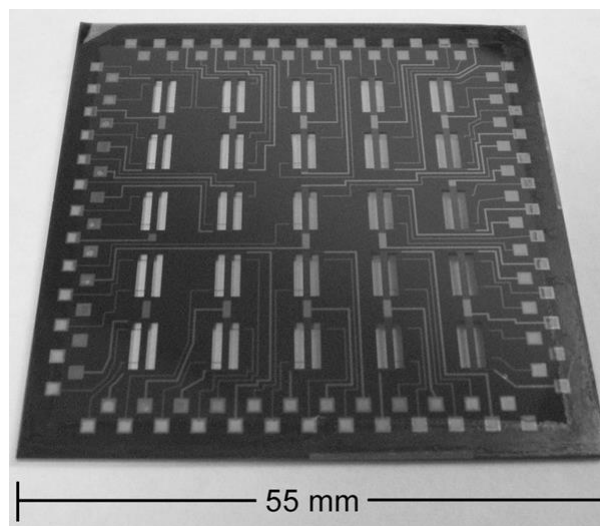
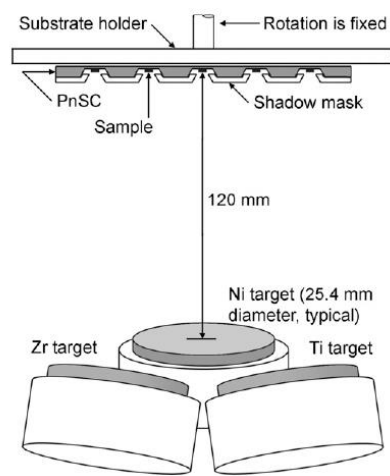
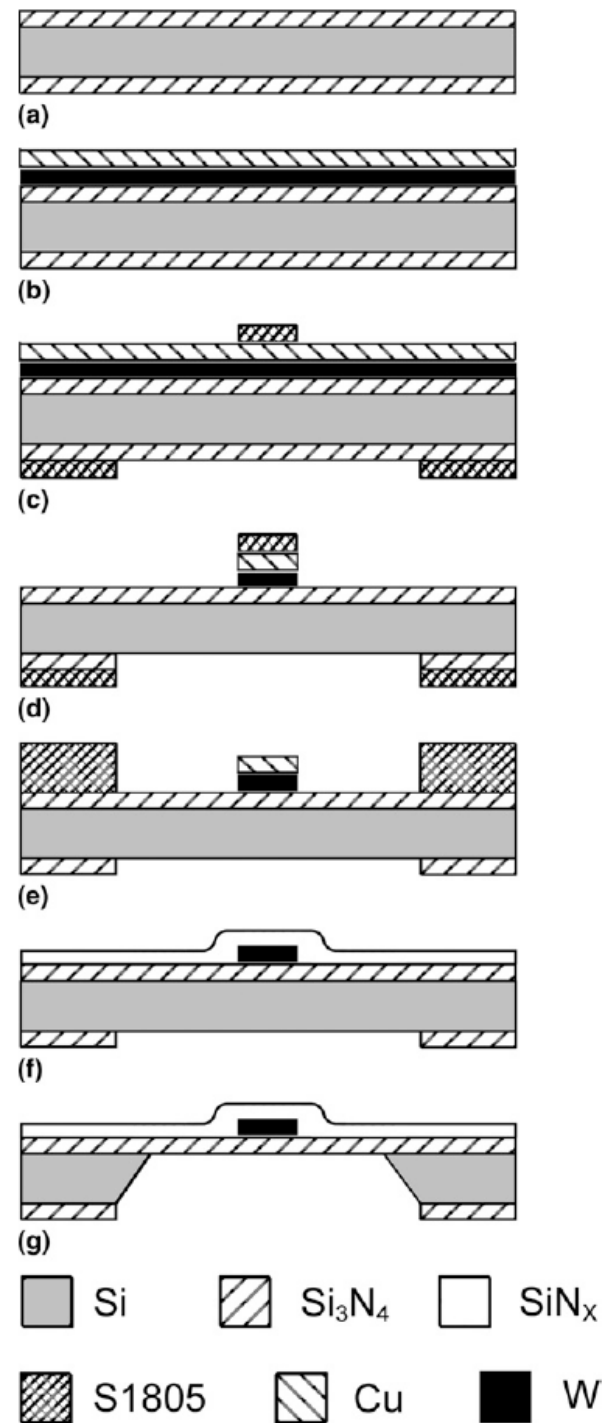
微机电结构（MEMS）可在较小面积内制备、并行处理大量微尺度样品或微系统，与材料高通量实验有着本征的相容性。微机电结构可在亚毫米或微米尺度构造加热器、传感器等，因而能够实现丰富的材料样品处理与测试功能。以此为基片，采用**薄膜法、喷射打印、超声雾化喷涂**等多种方法在微机电结构上制备组合材料样品库，可以方便对材料力学和热力学特性的研究。



微机电技术

非晶材料

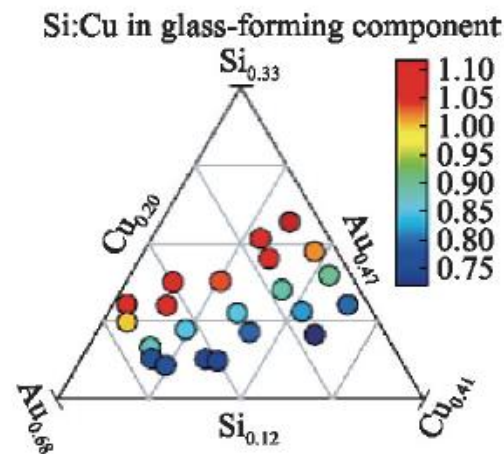
➤ Vlassak等利用微机电工艺在较小面积的基底上构造了包含22个微型加热/量热单元的并行纳米扫描量热系统，并通过三靶磁控共溅射的方法，在其上制备了包含22种不同成分的Ni-Ti-Zr和Cu-Au-Si玻璃态合金材料样品库。



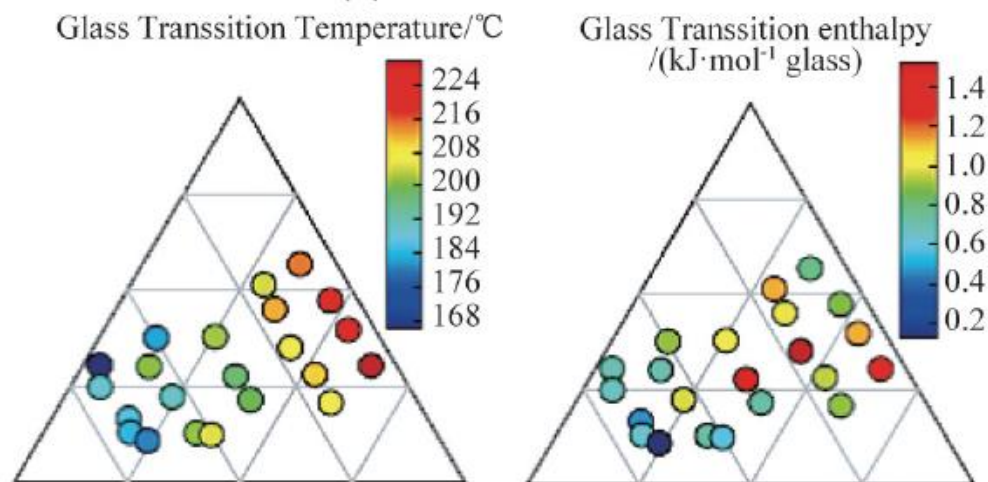
微机电技术

非晶材料

➤ 将并行纳米扫描量热测试和同步辐射微区X射线衍射相结合，快速表征了上述样品在 $2 \times 10^4 \text{ K s}^{-1}$ 淬火速率条件下玻璃态相变过程中的热力学参数，并绘制了Cu-Au-Si玻璃合金材料体系的玻璃态转变温度和相变焓的分布图。



(a) Si/Cu 元素比例



(b) 玻璃相转变温度

(c) 玻璃相转变焓

第三章 材料高通量制备技术（二）

一、多元扩散节

二、旋杆推进粉体熔炼法

三、3D打印

四、块体材料的高通量制备与加工技术

多元扩散节技术

- 将多个不同金属块紧密贴合在一起进行高温热处理，促使金属之间相互扩散形成固溶体或金属间化合物。成相在形成所需的材料成分“组合”的过程中同时发生，在界面附近区域切片即可得到大量组分连续渐变的合金。
- ✓ 快速测定相图（热力学数据）
- ✓ 快速测定扩散动力学数据
- ✓ 微区材料性能测试
- ✓ 快速获得成分-相-性能关系

多元扩散节技术

➤ 基本技术思路：

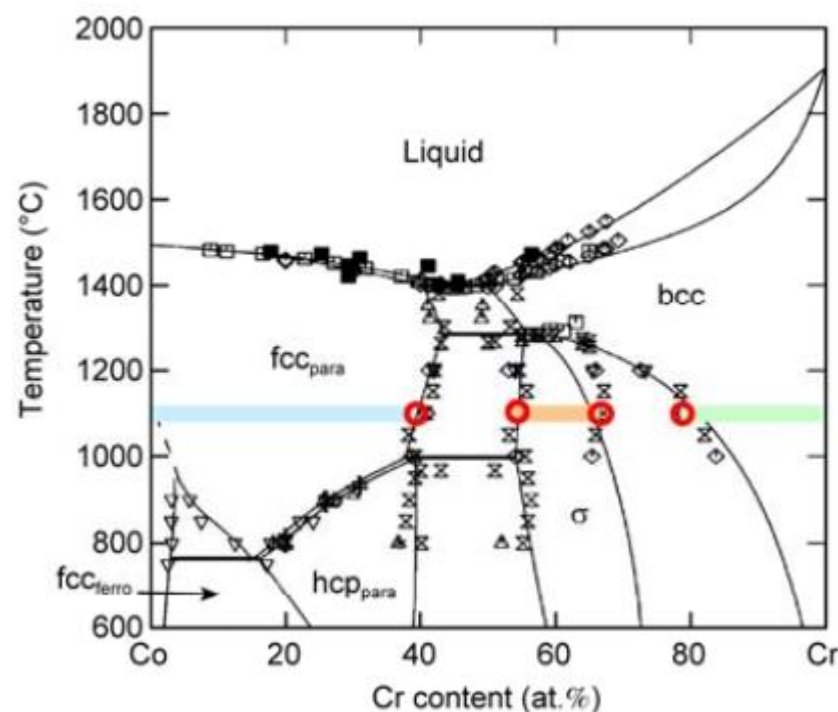
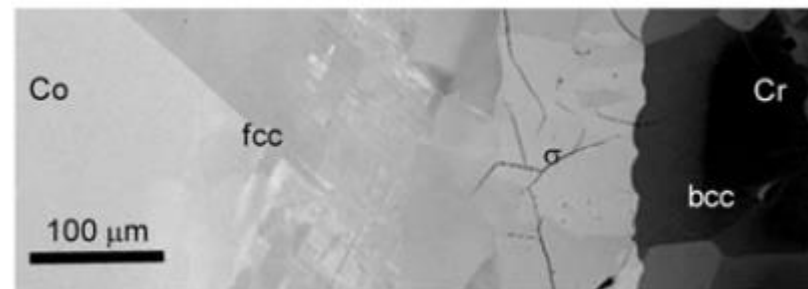
利用扩散实验形成的固溶体和化合物相的成分变化/梯度来实现微区能测试, 从而可以高效地获得成分-相-性能的关系.

➤ 技术条件：

这就需要一系列新的具有微米级空间分辨率的材料性能测试工具. 这些工具能用来测定不同成分合金的性能,

多元扩散节技术

将一块 Co 和 Cr 紧靠在一起
并在 1100°C退火 1000 h 后,
元素之间会相互扩散, 并在
面心立方(fcc)和体心立方(bcc)
固溶体之间形成一个中间相
(σ)扩散层。



多元扩散节技术

在退火温度下(1100°C)Co-Cr

相图中每个单相区的整个成分

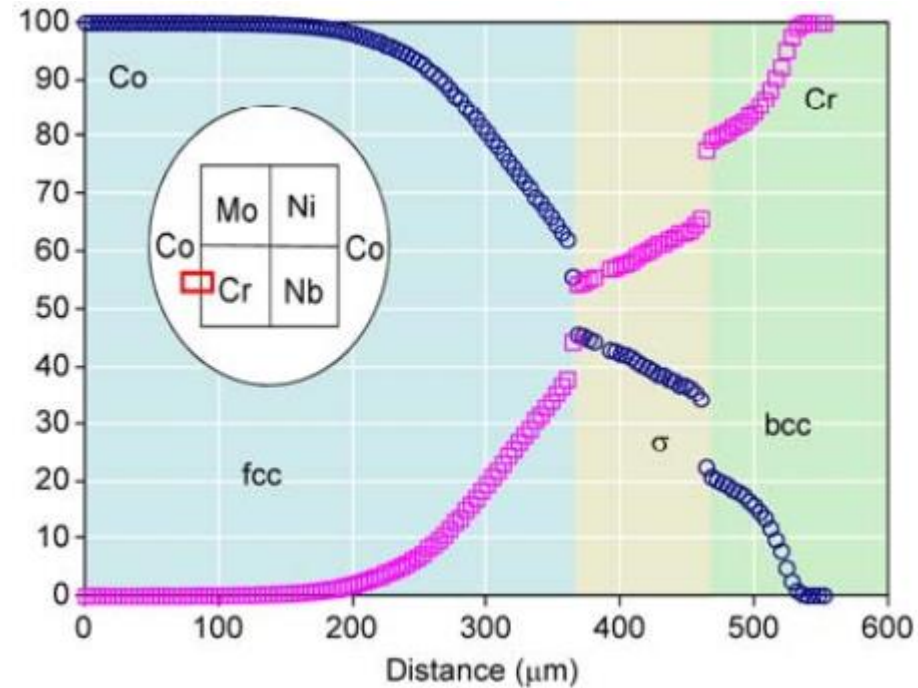
范围都可以从扩散中获得, Co

基 fcc 相中Cr 的成分范围是

0~39%(原子百分比, 下同); 相

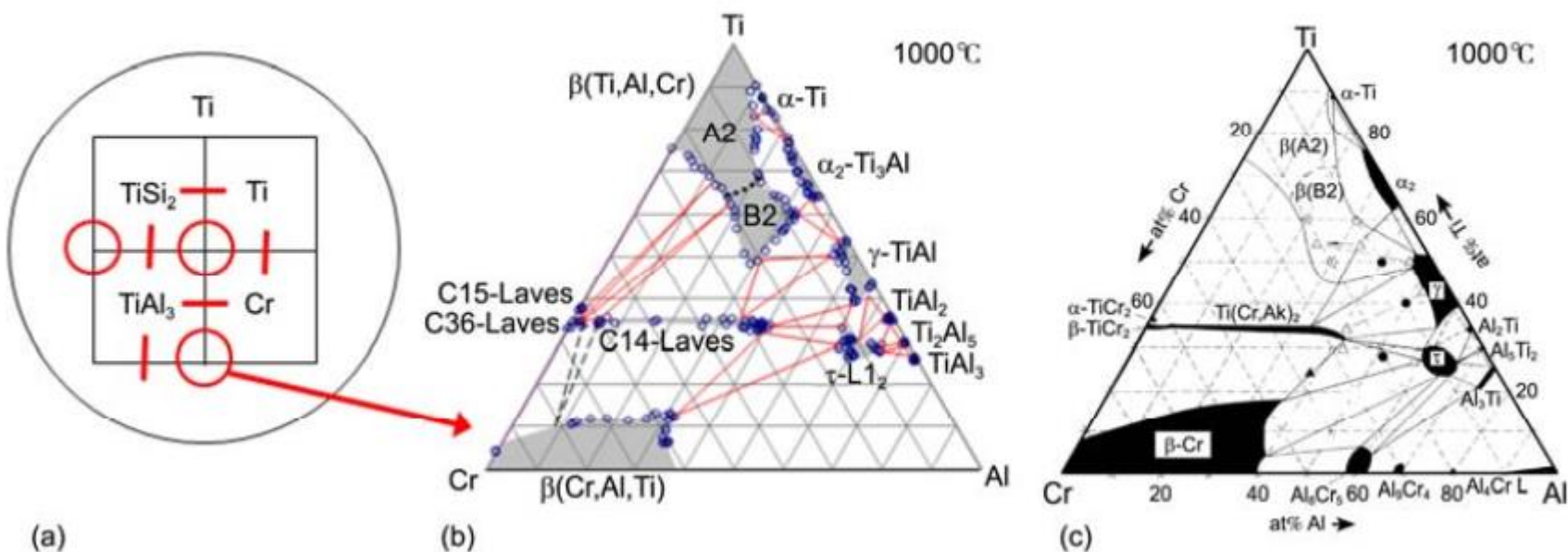
Cr 的成分范围是 54%~66%; Cr 基 bcc 相中 Cr 的成分

范围是 78%~100%.



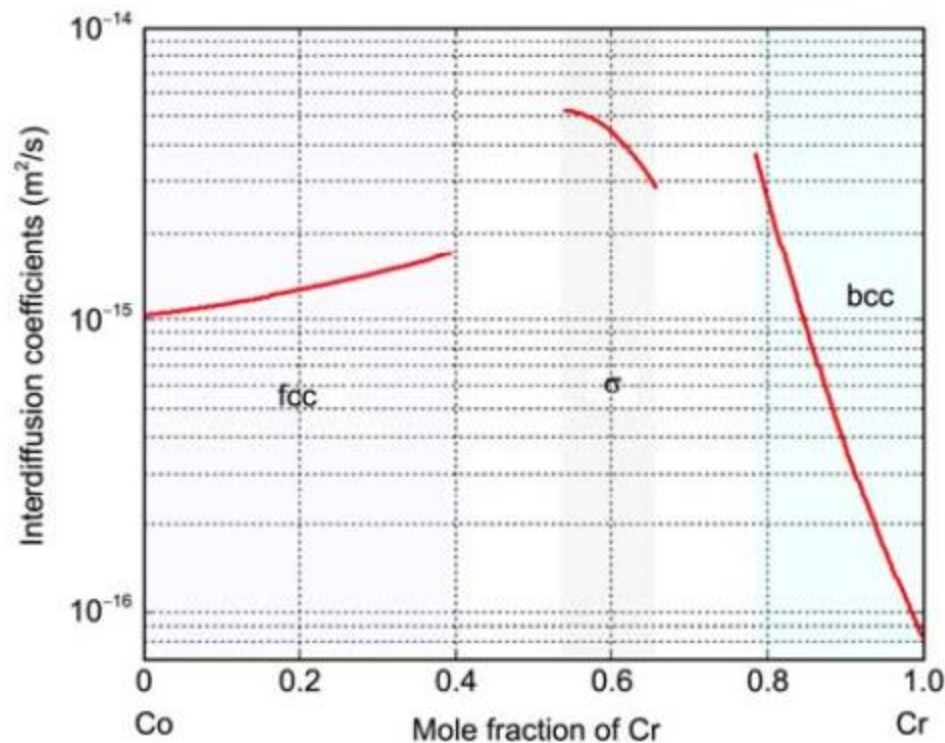
多元扩散节技术

为提高效率, 赵继成等人设计了集多个二元扩散偶和扩散三元节于一体的扩散多元节, 以便从一个试样上测定多个二元、三元相图. 同样也能从该试样中获得大量的性能测试所需的固溶体和中间相的成分梯度。



多元扩散节技术

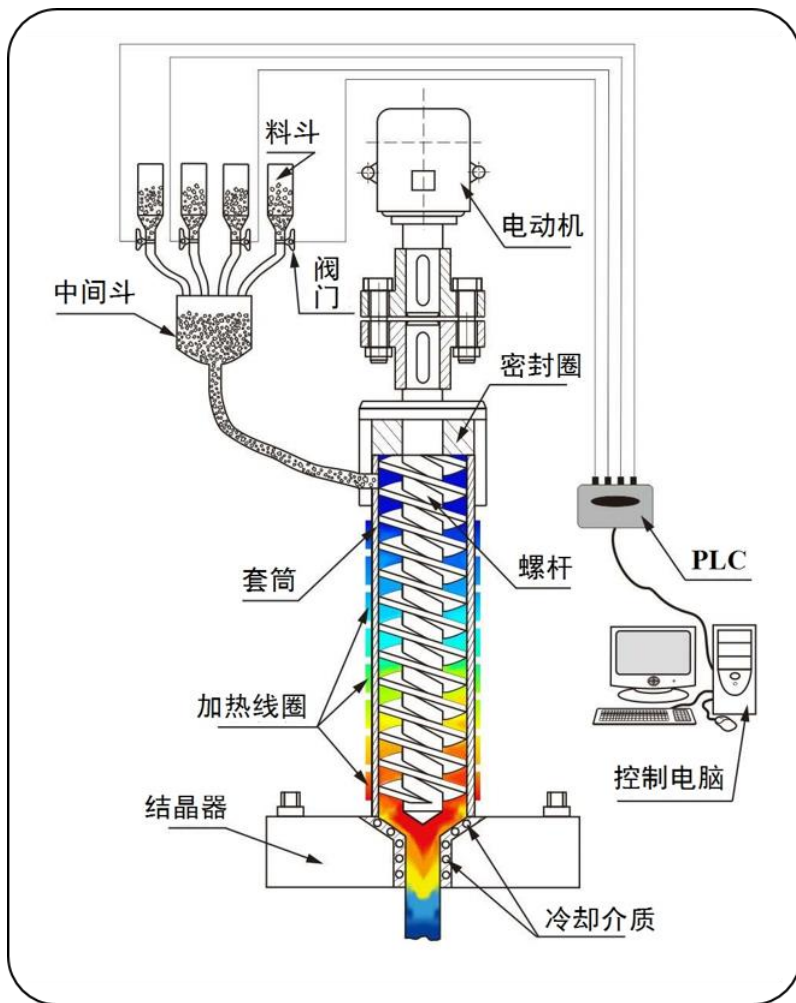
除了能够有效地测定相图以外, 扩散多元节可以用来采集大量的二元系的扩散成分分布曲线, 从而提取各个相的扩散系数随成分和温度的变化, 以构建原子迁移率的数据库, 用于材料析出长大及界面反应的模拟。



Co-Cr 二元系在 1100°C 扩散系数随成分的变化

旋杆推进粉体冶炼技术

● 高通量材料制备与表征



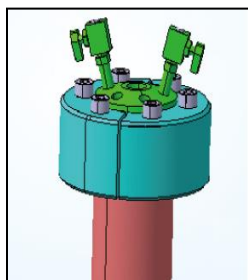
● 基本原理：

- ✚ 将多种金属粉末连续送入中间料斗进行混合，各种粉末的送入量由计算机在线调控；
- ✚ 混合粉末在自重作用下送入注射筒体内，在螺旋杆带动下向下流动；
- ✚ 混合粉末在感应线圈加热下，不断升温，形成温度梯度，并在注射筒体底部之前完全融化；
- ✚ 熔体进入结晶器凝固，被引锭机拉出形成成分连续变化的合金棒材；
- ✚ 最终实现多组元合金的高通量制备。

* 李静媛，张源，李建兴，谢建新. 发明专利，201610267117.5，2016-04-26.

二、基本概念和关键技术

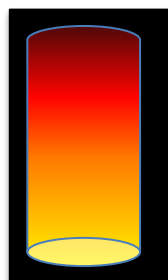
● 高通量材料制备与表征



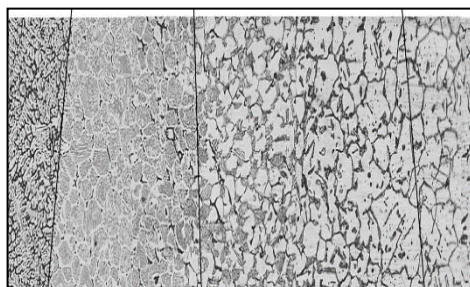
控制送料



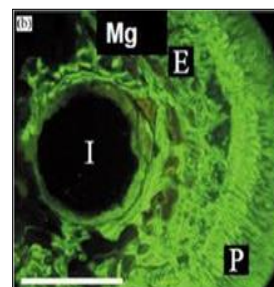
螺杆推进



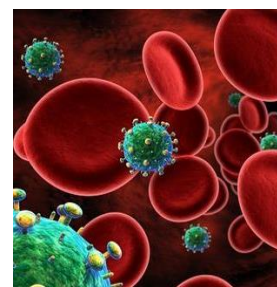
梯温加热



成分梯度分布棒材



降解性



细胞毒性评价



- 成分在线调节、集3D打印-注射成形-连续铸造基本原理于一体的梯度合金棒材制备新方法。



- 实现大尺寸、多组元、高自由度组合的合金样品高通量制备；
- 例如，Mg-、Zn-合金生物医用材料。



- 将梯度合金棒材置入同一服役环境（如模拟体液等）中，即可实现样品的高通量评价。

3D打印技术

- 3D打印技术又称激光增材制造技术，是近年来快速发展起来的一种先进制造技术，其工艺精度高、适用范围广泛，在材料科学研究领域，已被用于制备合金材料、复合材料和具备微纳米结构的材料样品。
- 通过电脑自动控制激光增材制造技术进行高通量合金材料实验，通过将不同元素的粉体以可控的速率递送至激光光束处烧结，从而可实现毫米至厘米尺度分立样品库的快速制备。
- 该方法可以灵活选择热平衡或非热平衡的工艺过程。

3D打印技术



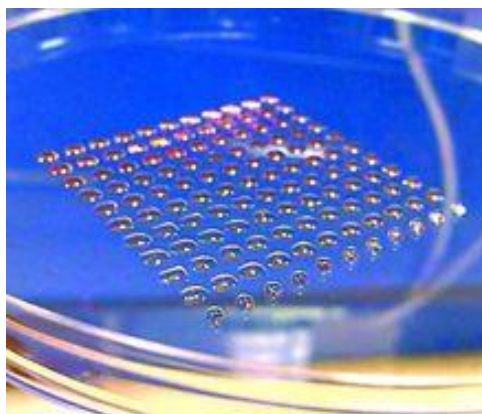
三分钟让你知道3D打印机究竟是如何制造的-

3D打印技术

优势：

- ✓ 原则上可以应用于任何材料。
- ✓ 原则上可以打印任何形状。
- ✓ 高效率
- ✓ 高空间分辨率

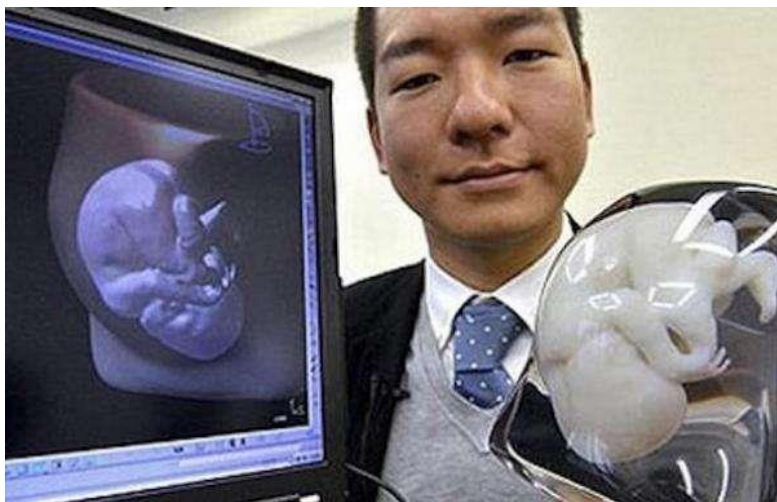
类型	累积技术	基本材料
挤压	熔融沉积式 (FDM)	热塑性塑料，共晶系统金属、可食用材料
线	电子束自由成形制造 (EBF)	几乎任何合金
粒状	直接金属激光烧结 (DMLS)	几乎任何合金
	电子束熔化成型 (EBM)	钛合金
	选择性激光熔化成型 (SLM)	钛合金，钴铬合金，不锈钢，铝
	选择性热烧结 (SHS)	热塑性粉末
	选择性激光烧结 (SLS)	热塑性塑料、金属粉末、陶瓷粉末
粉末层喷头3D打印	石膏3D打印 (PP)	石膏
层压	分层实体制造 (LOM)	纸、金属膜、塑料薄膜
光聚合	立体平板印刷 (SLA)	光硬化树脂
	数字光处理 (DLP)	光硬化树脂 ^[7]



3D打印技术

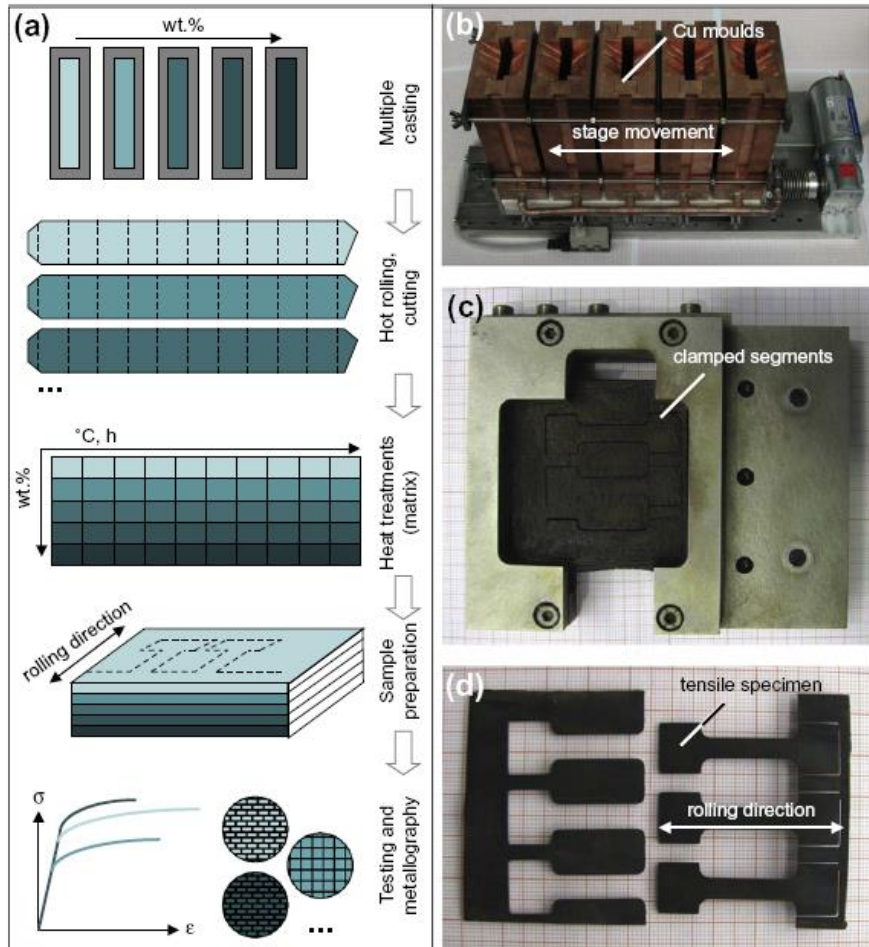
挑战和问题：

- 材料的限制
- 设备成本
- 知识产权
- 道德问题



高通量铸造和加工技术

Fe-30Mn-1.2C-xAl (wt.%)

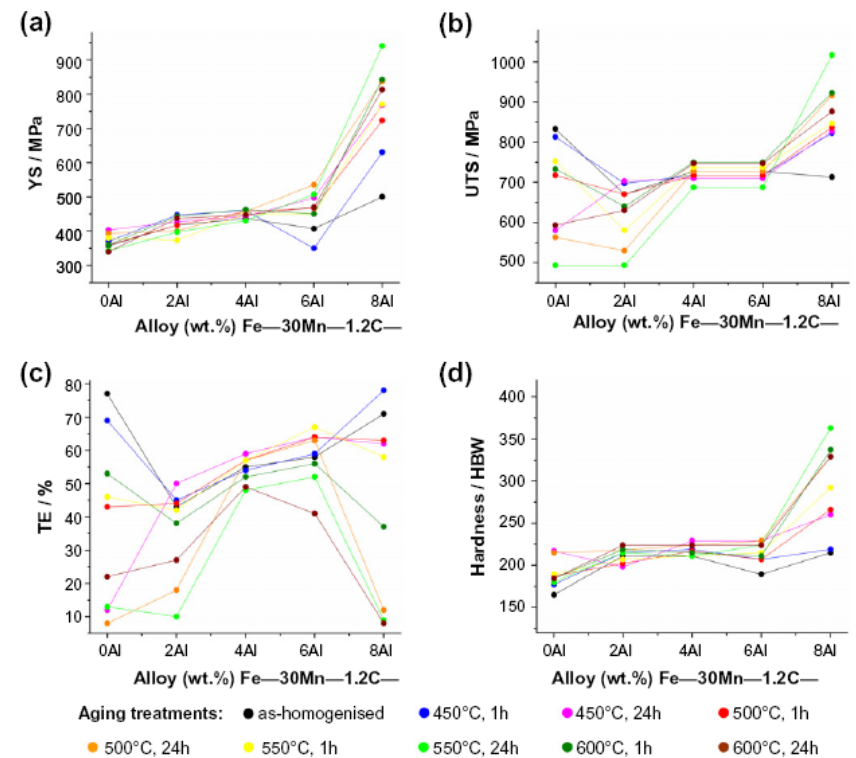


Target values (wt.%)

Fe-30Mn-1.2C
Fe-30Mn-1.2C-2Al
Fe-30Mn-1.2C-4Al
Fe-30Mn-1.2C-6Al
Fe-30Mn-1.2C-8Al

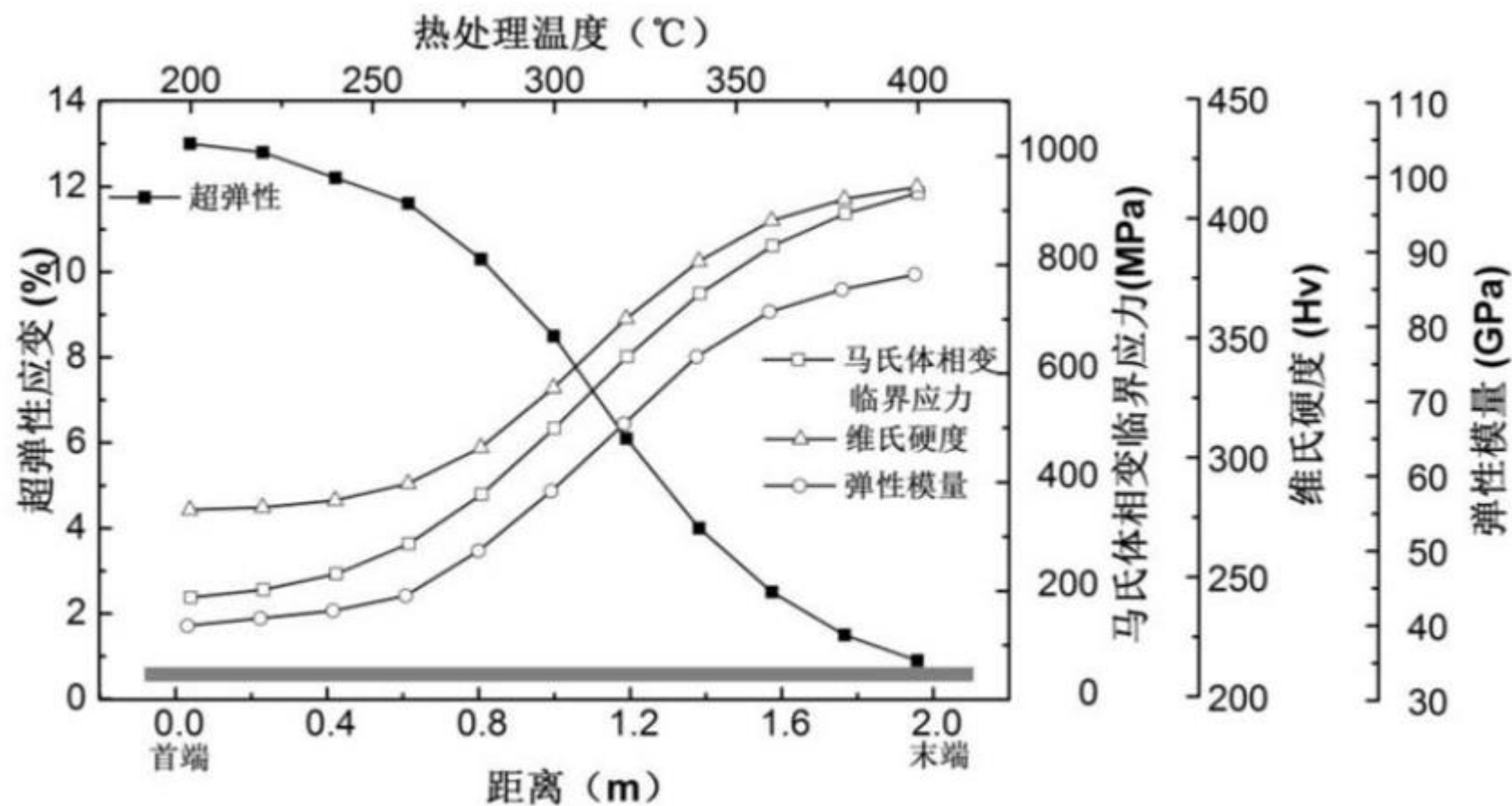
Actual values (wt.%)

Fe-30.5Mn-1.23C
Fe-31.0Mn-1.20C-2.12Al
Fe-31.4Mn-1.19C-4.30Al
Fe-31.3Mn-1.20C-6.42Al
Fe-31.6Mn-1.17C-9.04Al



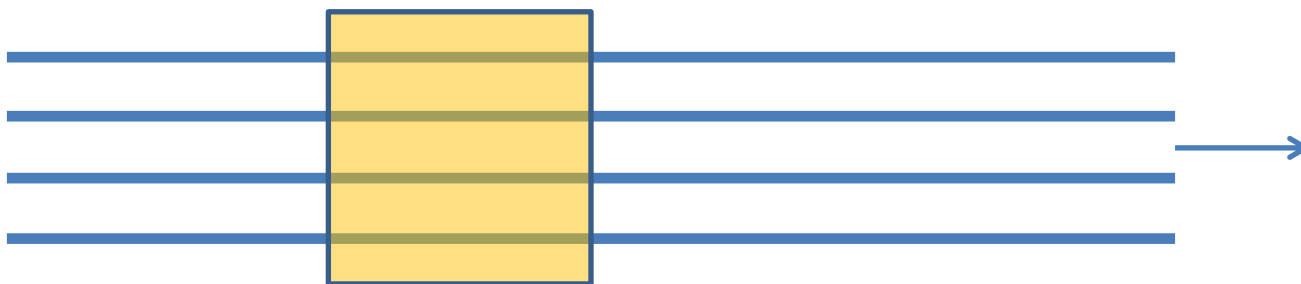
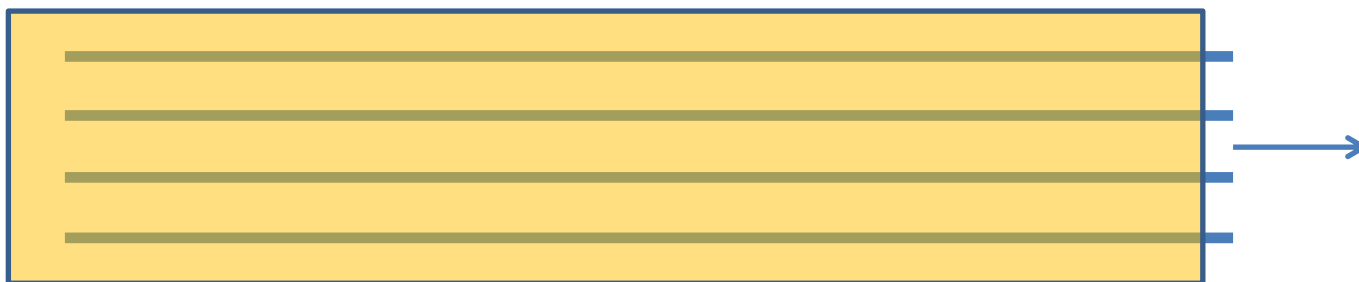
梯度热处理

温度梯度



梯度热处理

时间梯度



高通量制备技术

高通量制备的实现途径：

- 海量“组合”：将多种组元可控的进行组合
- 连续梯度：将单一、均匀参量转化为连续梯度变量。
- 充分利用原子组装、溶液、粉末等易“组合”形态。

高通量制备技术

挑战或发展方向：

- 连续变化参量 → 信息分辨率（实验通量）由表征方法的空间分辨率和时间分辨率决定 → 高通量表征新技术
- 大尺寸样品的高通量制备技术