

哈尔滨工业大学(威海)
材料科学与工程学院



微电子制造科学与工程

Chapter 6 /第六章

Rapid Thermal Processing RTP/快速热处理

王华涛

办公室：A楼208

Email: wanghuatao@hit.edu.cn

Tel: 0631-5297952

更新日期2017年3月19日

快速热处理

主要内容

1. 背景_问题的引出
2. 光源系统
3. 加热腔体设计
4. 晶圆片的温度均匀性
5. 温度测量
6. RTP用于杂质的快速激活
7. RTP用于制备超薄介质 SiO_2
8. RTP用于硅化物生长



Low Cost 4 and 6-inch Rapid Thermal Processing Furnace

问题引出

问题：杂质在高温下再分布，如何解决？

方案一：降低温度，减小扩散

方案二：缩短保温时间，减小扩散

方案一，降低温度

- 矛盾1：离子注入后，为消除晶格损伤，需要高温，低温效果不好
- 矛盾2：为完全激活杂质，需要高温1000℃退火
- 因此，不得不使用高温

方案二，缩短保温时间

- 升温、降温速率的考量
- 传统的管式加热，从外向内，温度变化太快，形成温度梯度很大，容易导致晶圆片翘曲，所以需要缓慢升温和降温→导致明显扩散
- 因此，不但要缩短保温时间，还要减小升温、降温时间

引入，快速热处理，RTP, Rapid Thermal Processing

- 快速升温和降温
- 离子注入后 杂质激活 晶格损伤修复

本章的两个关键问题

1. 温度的均匀性

—晶圆片加热、冷却过程中，如何保持温度均匀

2. 晶圆片温度的测量

RTP 升温速度有多快

- Rapid thermal processing (RTP) provides a way to rapidly heat wafers to an elevated temperature to perform relatively short processes, typically less than 1-2 minutes.
- up to 1,200°C or greater, at the rate of 20-250°C/sec

快速热处理的分类

如何进行快速加热？

- 传导、对流、辐射？
- 如何提高辐射的强度，即单位面积、单位时间的功率？

根据加热类型进行分类

— 绝热型、热流型、等温型

绝热型：宽束相干光源，如准分子激光器，（[相干光源，详见补充知识](#)）

- 加热时间最短
- 温度、退火时间难于控制，纵向的温度梯度大，成本高

热流型：高强度点光源，如电子束、聚焦激光

- 对晶圆片扫描加热，横向温度不均匀，不适用于IC

等温型：宽束辐射加热，采用非相干光源，如钨-卤灯

- 加热数秒，横向、纵向的温度梯度都很小
- 现行的商用RTP都采用这种类型，本章重点介绍

辐射

1. 灰体的辐射能力，斯特潘-玻尔兹曼Stefan-Boltzman公式，

$$M(T)=\epsilon\sigma T^4$$

- 一个物体辐射出的能量与其温度的四次方成正比

2. 色温， $\lambda_{\max}=\frac{0.2898 \text{ cm}\cdot\text{K}}{T}$

- 通过发射体发射谱形状与最佳拟合的黑体发射谱形状比较确定的温度。
- 1700 K: 火柴光
- 1850 K: 蜡烛
- 2800 K: 钨灯（白炽灯）
- 4100 K: 月光
- 5000 K: 日光

色温

Temperature	Source
1,700 K	Match flame
1,850 K	Candle flame, sunset/sunrise
2,700–3,300 K	Incandescent lamps
3,000 K	Soft (or Warm) White compact fluorescent lamps
3,200 K	Studio lamps, photofloods, etc.
3,350 K	Studio "CP" light
4,100–4,150 K	Moonlight, ^[2] xenon arc lamp
5,000 K	Horizon daylight
5,000 K	tubular fluorescent lamps or Cool White/Daylight compact fluorescent lamps (CFL)
5,500–6,000 K	Vertical daylight, electronic flash
6,500 K	Daylight, overcast
5,500–10,500 K	LCD or CRT screen
15,000–27,000 K	Clear blue poleward sky

色温（color temperature）是表示光源光色的尺度，单位为K（开尔文）
色温是按绝对黑体来定义的，光源的辐射在可见区和绝对黑体的辐射完全相同时，此时黑体的温度就称此光源的色温。

高强度光源和加热腔体设计

大部分等温型系统，采用钨-卤灯或惰性气体长弧放电灯作为能源。

钨卤灯，Halogen lamp，白炽灯的加强版，

与白炽灯的区别

- 钨卤灯的玻璃外壳中充有一些卤族元素气体(通常是碘或溴)

其工作原理为

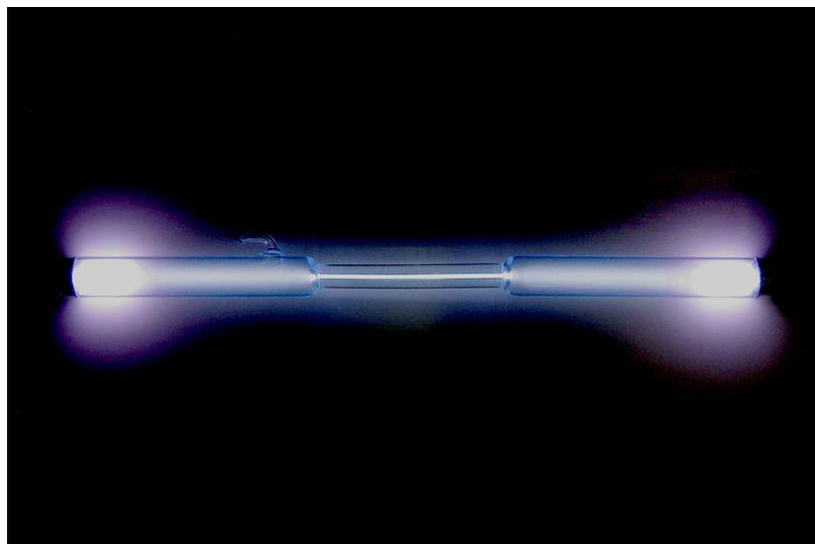
- 当灯丝发热时，钨原子被蒸发后向玻璃管壁方向移动，当接近玻璃管壁时，钨蒸气被冷却到大约 800°C 并和卤素原子结合在一起，形成卤化钨(碘化钨或溴化钨)。
- 卤化钨因热流向玻璃管中央继续移动，又重新回到被氧化的灯丝上，由于卤化钨是一种很不稳定的化合物，其遇热后又会重新分解成卤素蒸气和钨，
- 这样钨又在灯丝上沉积下来，弥补被蒸发掉的部分。通过这种再生循环过程，灯丝的使用寿命不仅得到了大大延长(几乎是白炽灯的4倍)，同时由于灯丝可以工作在更高温度下，从而得到了更高的亮度，更高的色温和更高的发光效率。



高强度光源和加热腔体设计

惰性气体弧光灯(nobel gas arc lamp)

- 弧光灯：这种灯有两个电极，通常是以熔点高的金属_钨制成，在电极之间，电离气体，发光。
- 在灯泡中充填的气体，通常分成氖、氙、氦、氩、钠、卤化物及水银等。
- 一般的日光灯, 充填了低压水银气体的弧光灯。



高强度光源和加热腔体设计

A 钨卤灯与弧光灯的比较

钨卤灯 0.8~4.0 μm , 15%吸收, 效率低, 多组加热

弧光灯 0.39~0.76 μm 可见光, 大部分被吸收, 效率高, 大功率, 需水冷

吸收率由哪些因素影响?

未掺杂的Si, 禁带宽度 **1.1eV**, 吸收 $\leq 1.1\mu\text{m}$ 的光

$$\lambda_g (\text{nm}) = 1240/E_g(\text{eV})$$

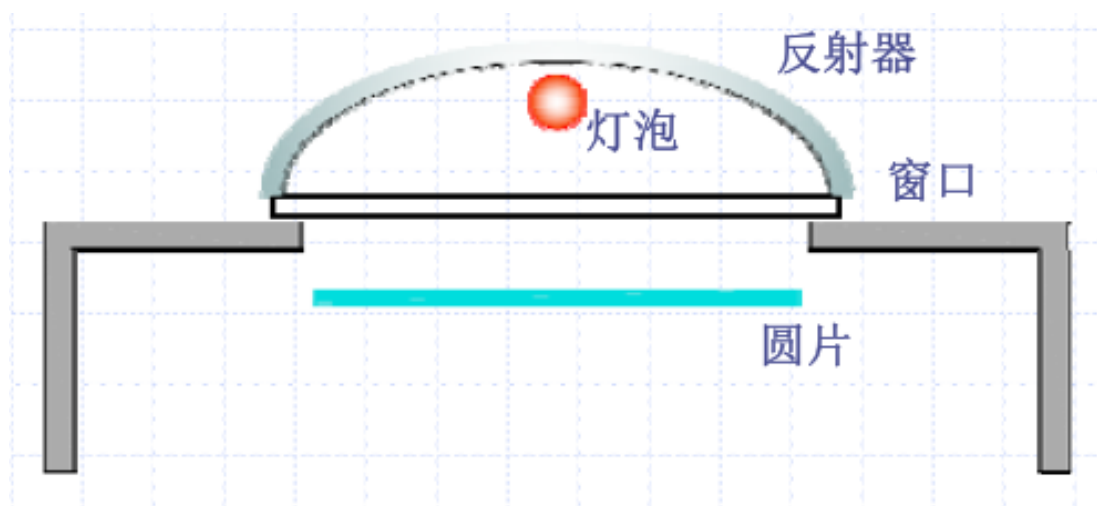
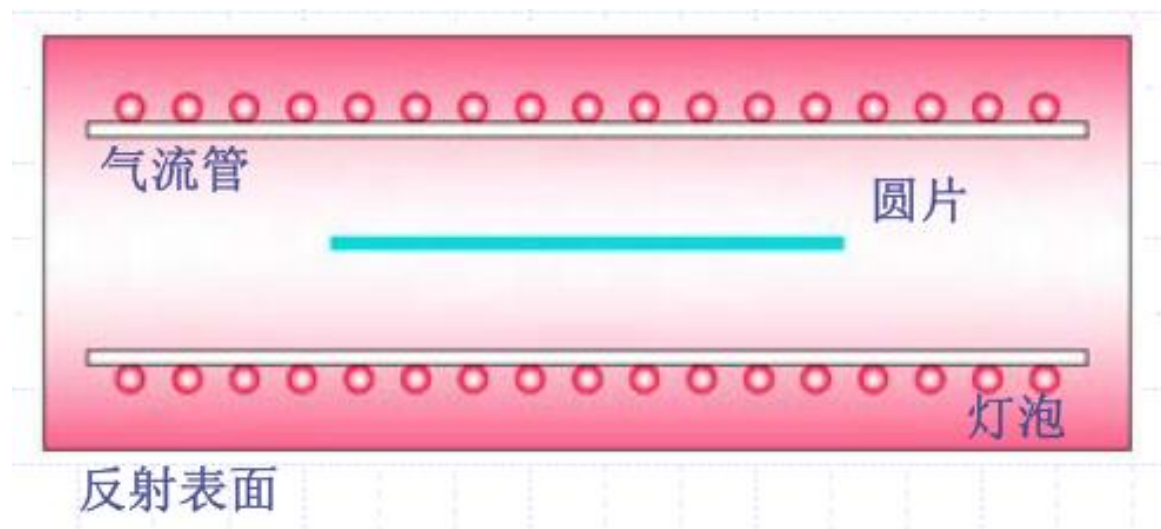
B 加热腔体设计

光源有了, 加热腔体应该如何设计, 保证温度的均匀性?

- 上下面加热
- 表面粗糙, 漫反射

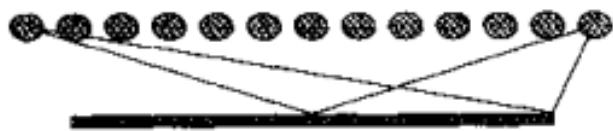
高强度光源和加热腔体设计

氮气冷却灯泡和石英管的外表面

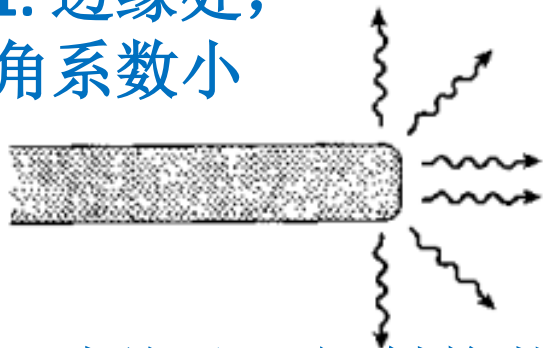


晶圆片的温度均匀性_内高外低 原因

如何设计，避免边缘处的温差？



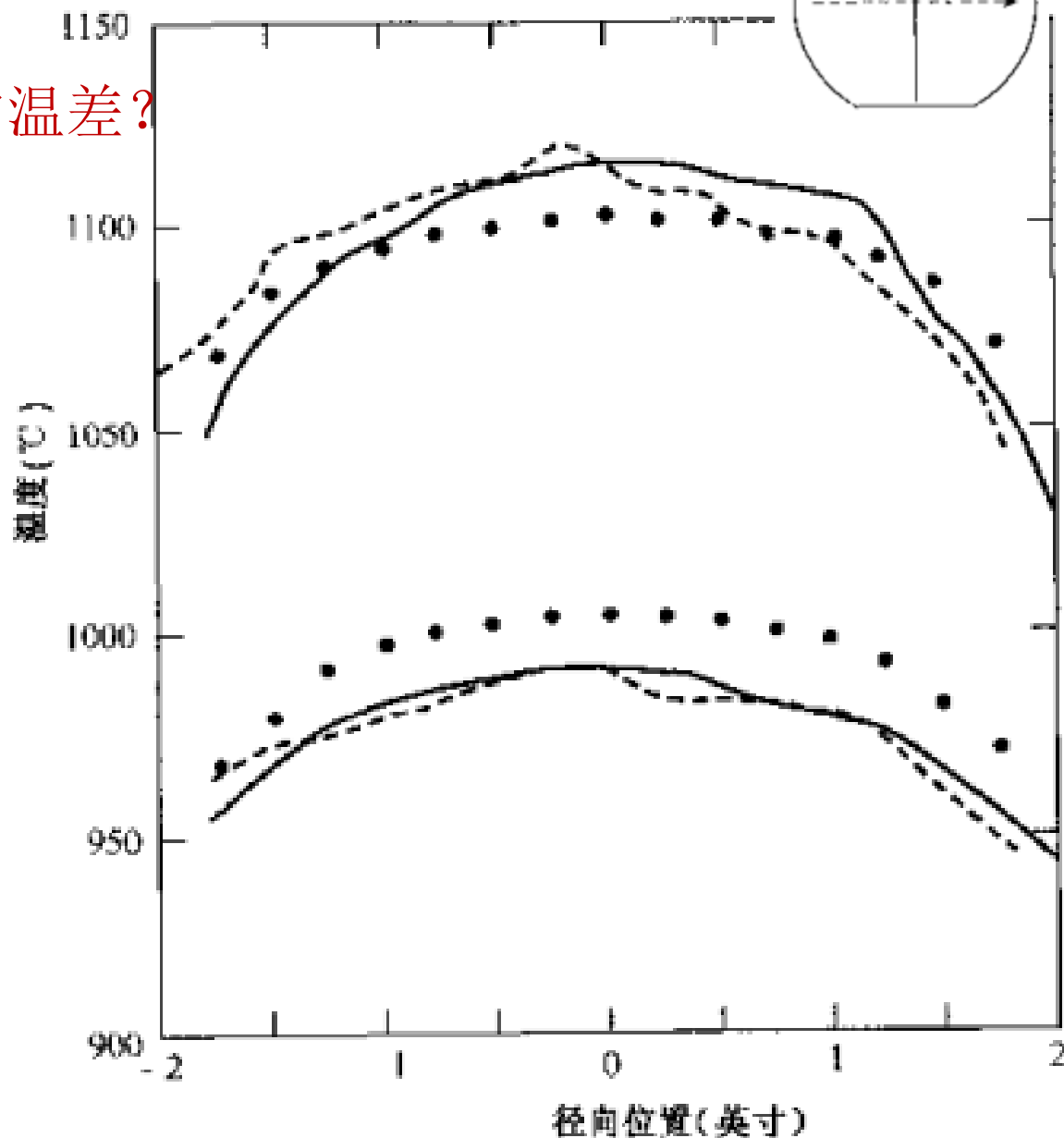
1. 边缘处，
角系数小



2. 边缘处，辐射换热少



3. 边缘处，对流和传导，
热损失



晶圆片的温度均匀性

多温区，独立加热， **Multizone heater**

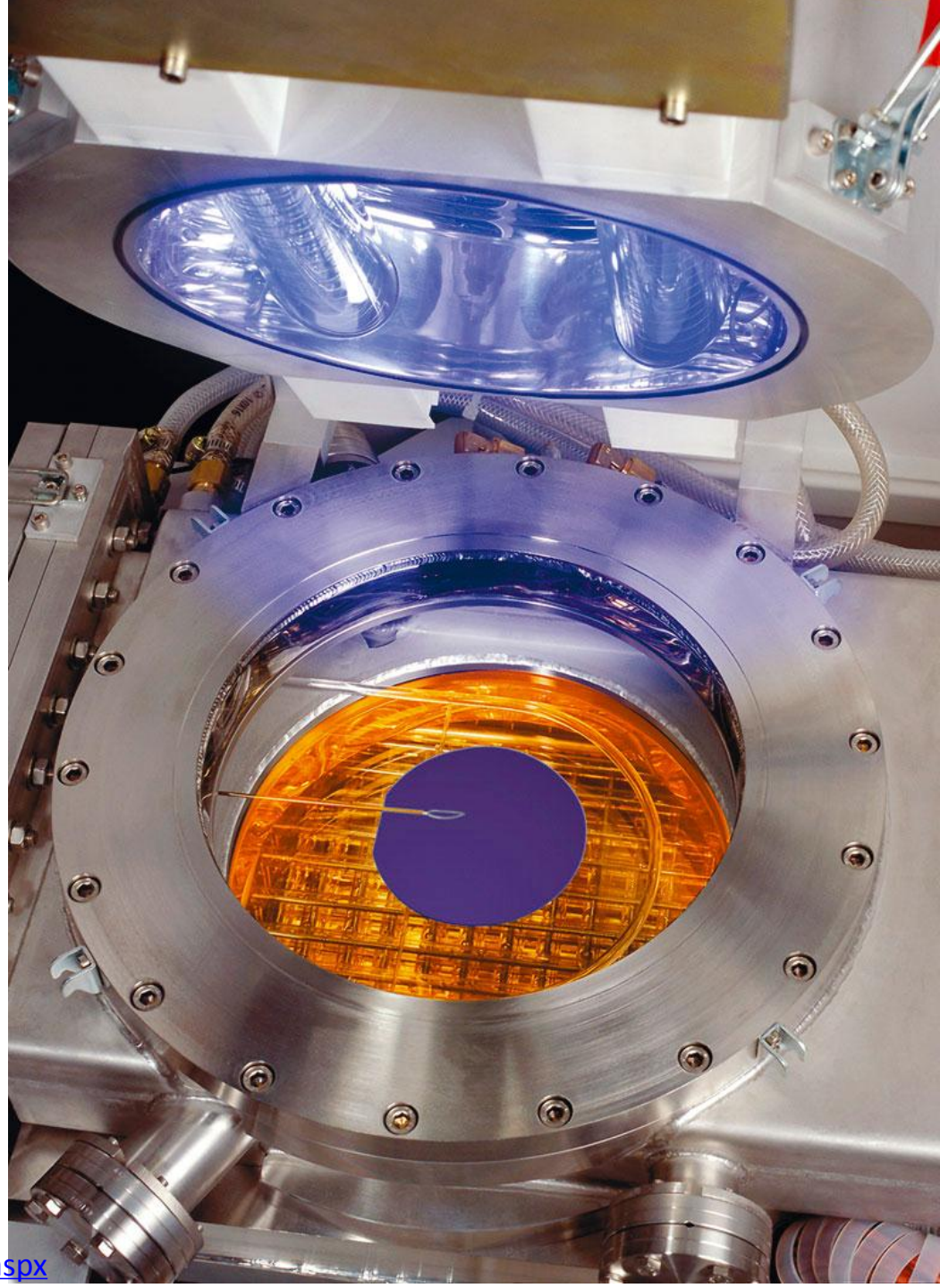


测温

第二个关键问题：如何测温？

1. 红外测温

$$M(T)=\varepsilon\sigma T^4$$



测温

1. 红外测温

- 需要考虑，过滤灯泡的波长

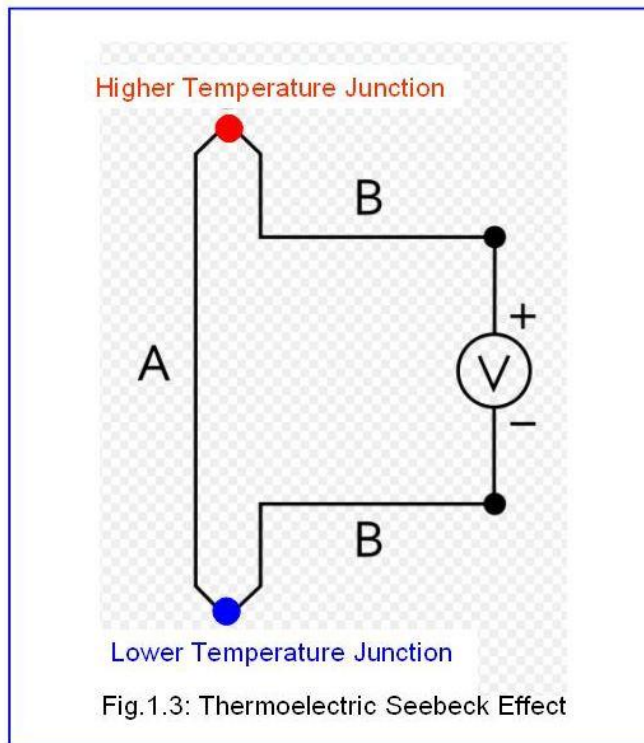
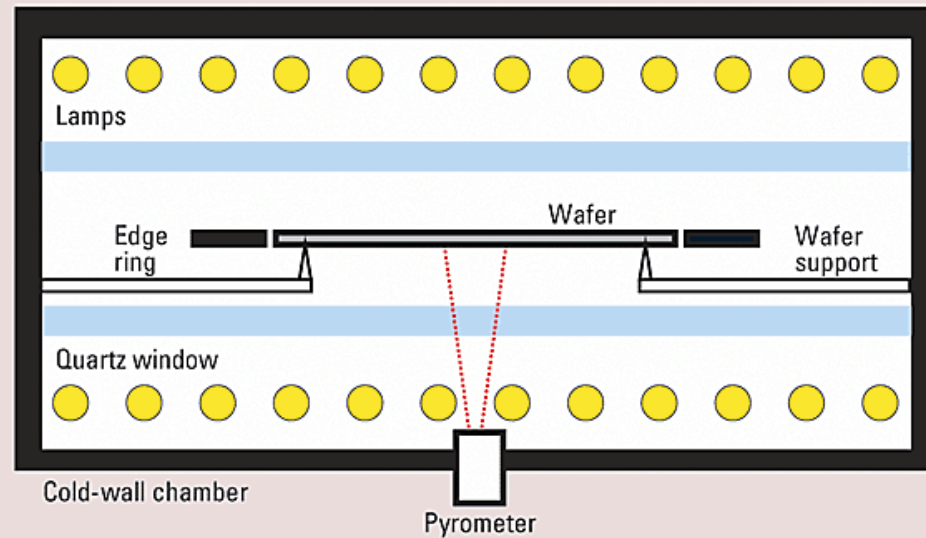
其他方案？

2. 塞贝克效应， 热电测温

- 双金属结
- 电压
- 温度

<http://www.brighthub.com/engineering/mechanical/articles/87501.aspx>

RTP SYSTEM CONFIGURATION



In a typical rapid thermal processing furnace, the wafer is heated by two banks of linear lamps. (Source: Mattson Technology)

<http://www.engr.uky.edu/~cens/e/equipment/rtp.html>

杂质的快速热激活_RTP的起源

杂质只要存在于半导体中，就可以起到掺杂的作用么？如，在Si中，通过离子注入大量的B，Si的电阻率就下降了？

- 填隙原子和置换原子，何者起到掺杂作用？
- 离子注入，形成大量的填隙原子，需要加热激活，形成置换原子，即杂质占据晶格位置
- 杂质激活：通过热作用，将大部分注入杂质移动到晶格位置，形成有效电活性杂质
- 需要高温激活杂质
- RTP, 为什么要快速？ 下文回答

杂质的快速热激活

经过**RTP**，有效杂质浓度超过固溶度；短时间退火，获得有效的高掺杂浓度

- As RTP数毫秒退火，浓度可达 3×10^{21} 左右，是固溶度的十倍
- 非热力学平衡态
- 因为时间短，As原子没有足够的时间聚集形成团簇，无法形成没有活性的缺陷 **inactive defects**。

缺陷浓度 $C = A \exp(-\frac{E}{kT})$

- 杂质在硅中，进行稳态扩散和瞬时扩散的活化能，eV

	稳态扩散	瞬时扩散
B	3.5	1.8
As	3.4	1.8
P	3.6	2.2

杂质的快速热激活

浓度峰值和尾区（表面）处，未完全激活；非所有杂质都被激活
其他处，经过热激活，杂质浓度明显提高

退火后：电活性PN结（黑点实测），浅；
化学PN结，深（实线）

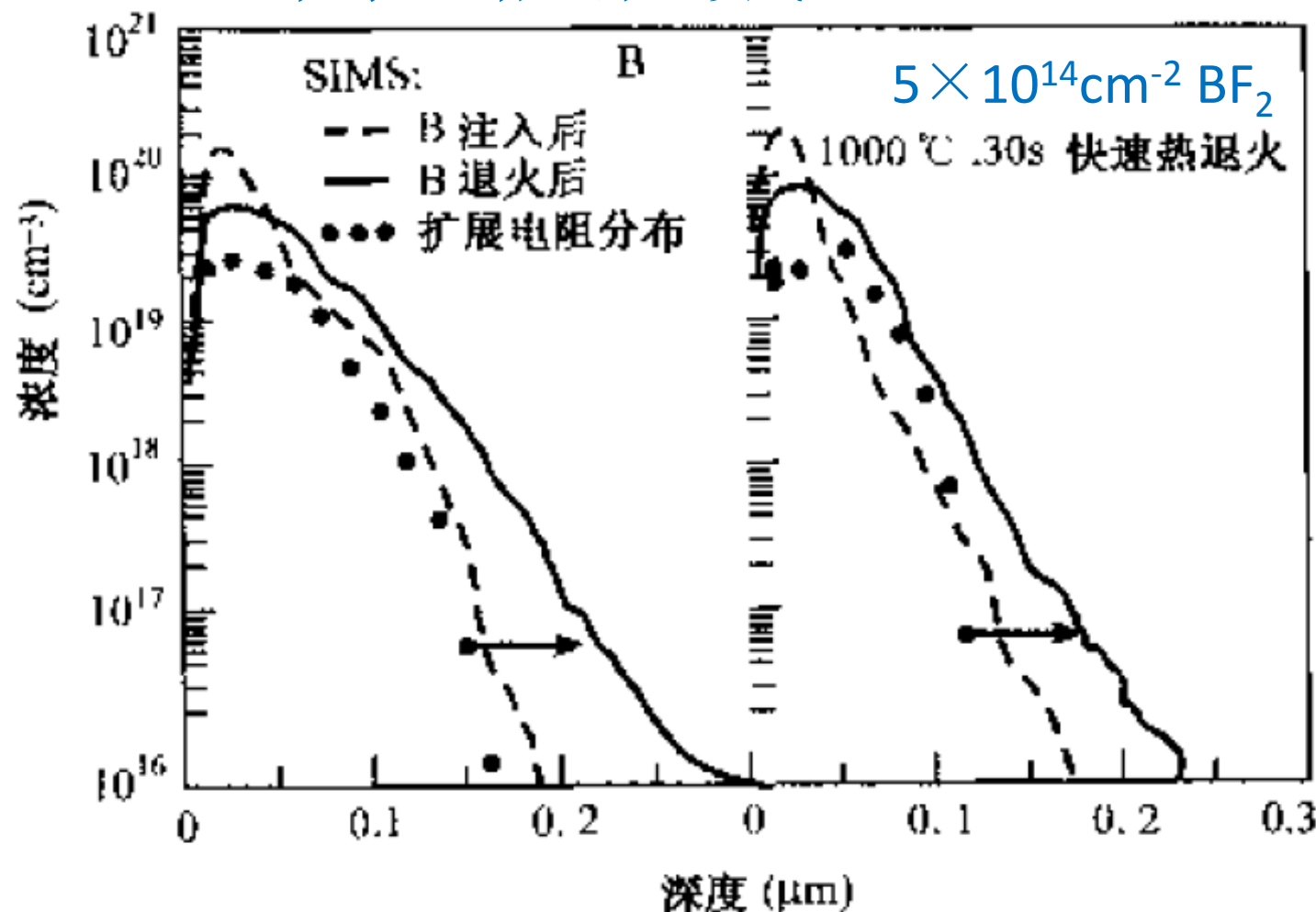


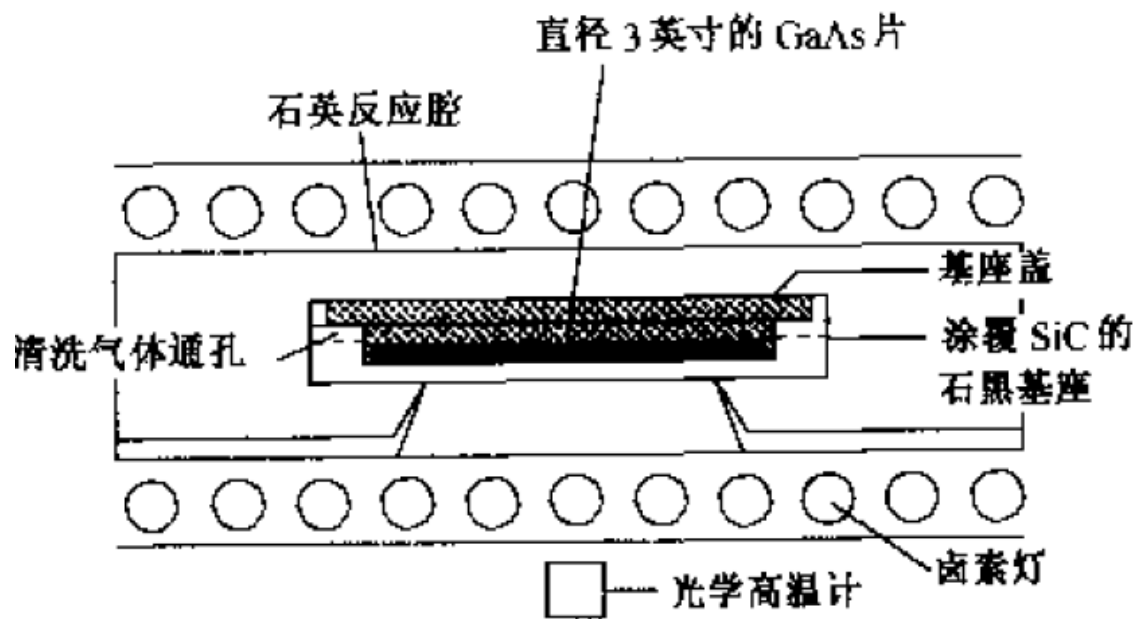
图6.11
硼在RTP中进行
非完全激活后
其化学杂质
分布和具有
电活性的杂质
分布

杂质的快速热激活

GaAs中的热激活，需要覆盖层，防止As向外扩散，覆盖层 Si_3N_4 或者 SiO_xN_y

使用石墨基座代替覆盖层（黑色区域）， 图6.12

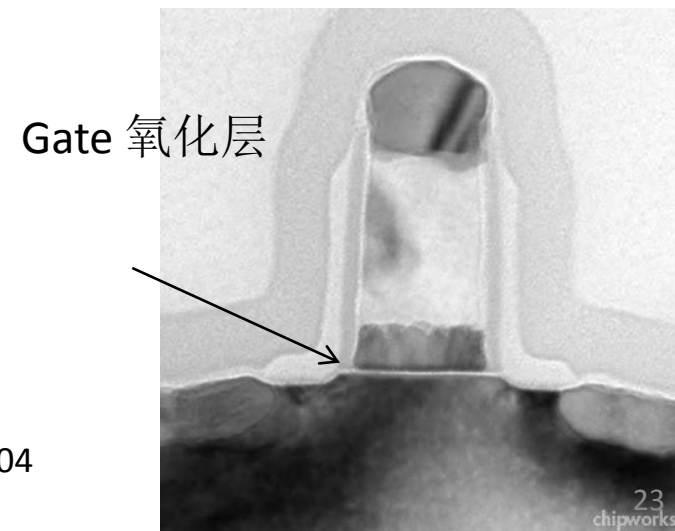
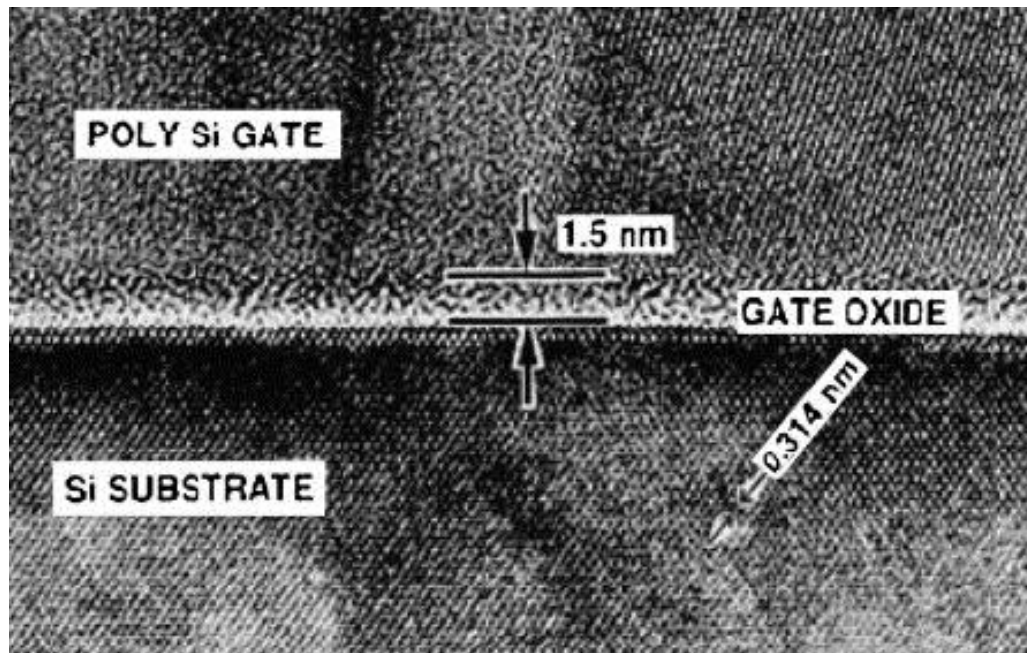
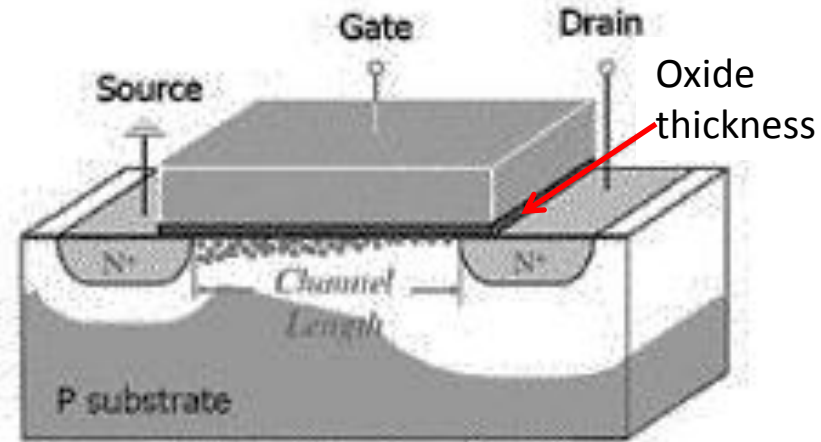
使用另一**GaAs**晶圆片做覆盖层（上部**GaAs**晶圆片）， 图6.12



RTP用来形成薄层介质

深亚微米器件，需要极薄的 SiO_2 介质层，如何制备？

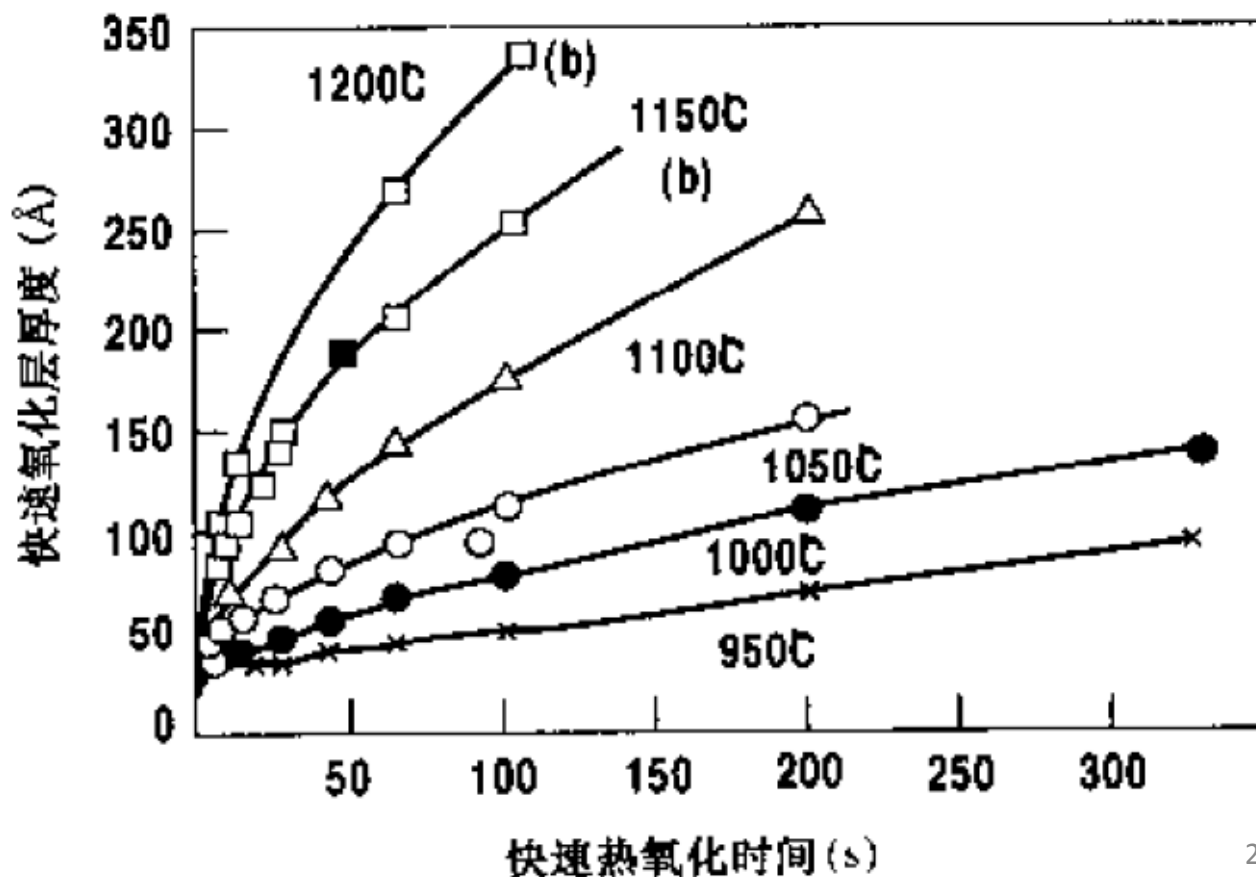
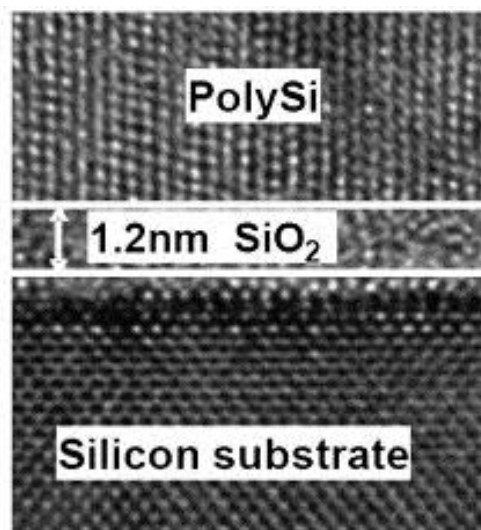
- 1. 降低温度，界面电荷和界面态密度增加
- 2. 缩短时间，保持原来的温度，同时减小反应物浓度



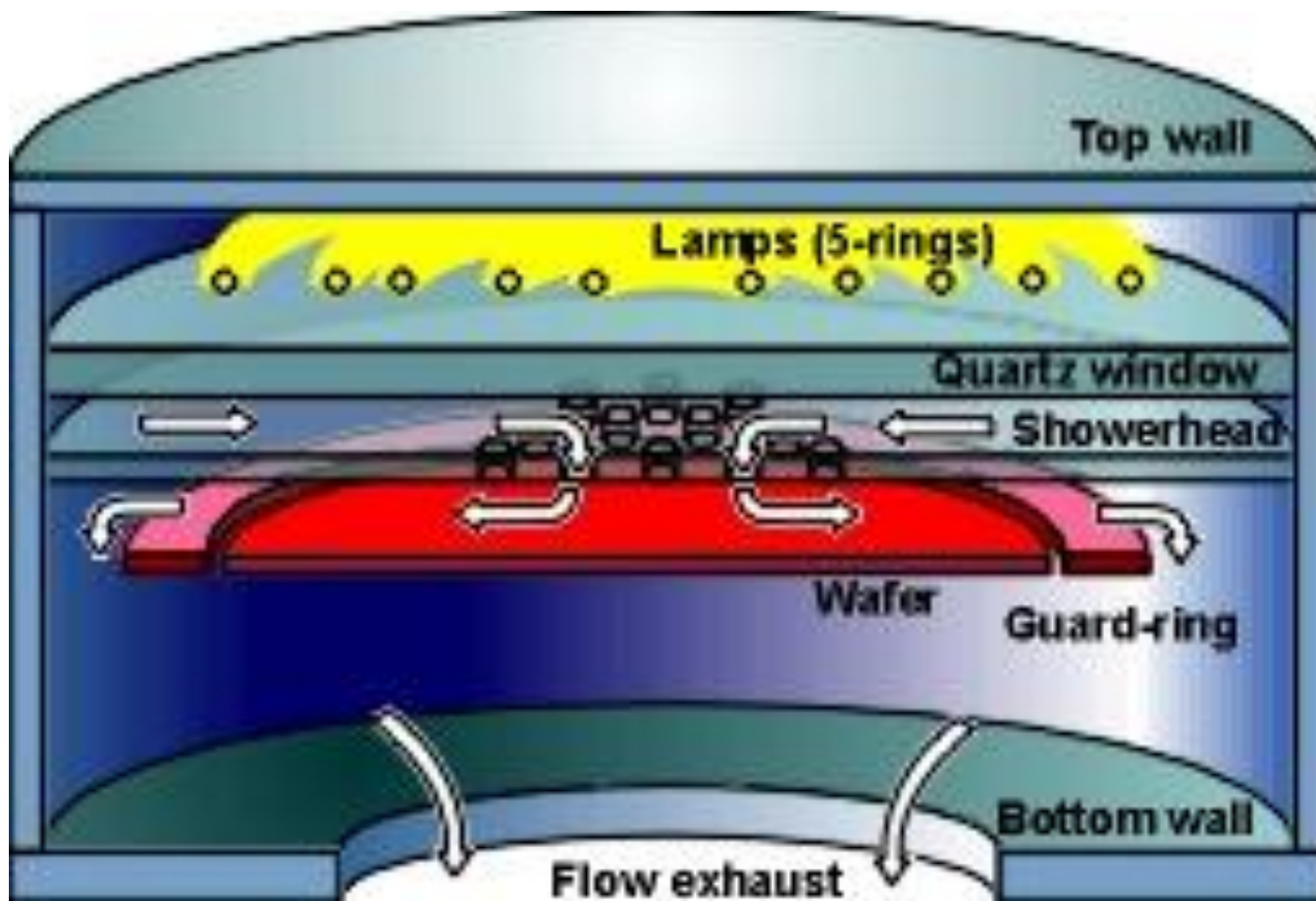
RTP用来形成薄层介质

快速热氧化, RTO, Rapid Thermal Oxidation

- 干氧工艺
- 右图
- 含氮的气氛中, 生长氧化层, 对B的阻挡能力强;
- 少量的F掺杂, 生长的氧化层, 好的击穿特性



RTP用来形成薄层介质



反应气体

Generic **RTP reactor**: axisymmetric(轴对称) geometry with five independent lamp rings, quartz window and showerhead(喷头), and silicon guard ring(护圈).

RPA, 用来形成硅化物

半导体_低电阻？

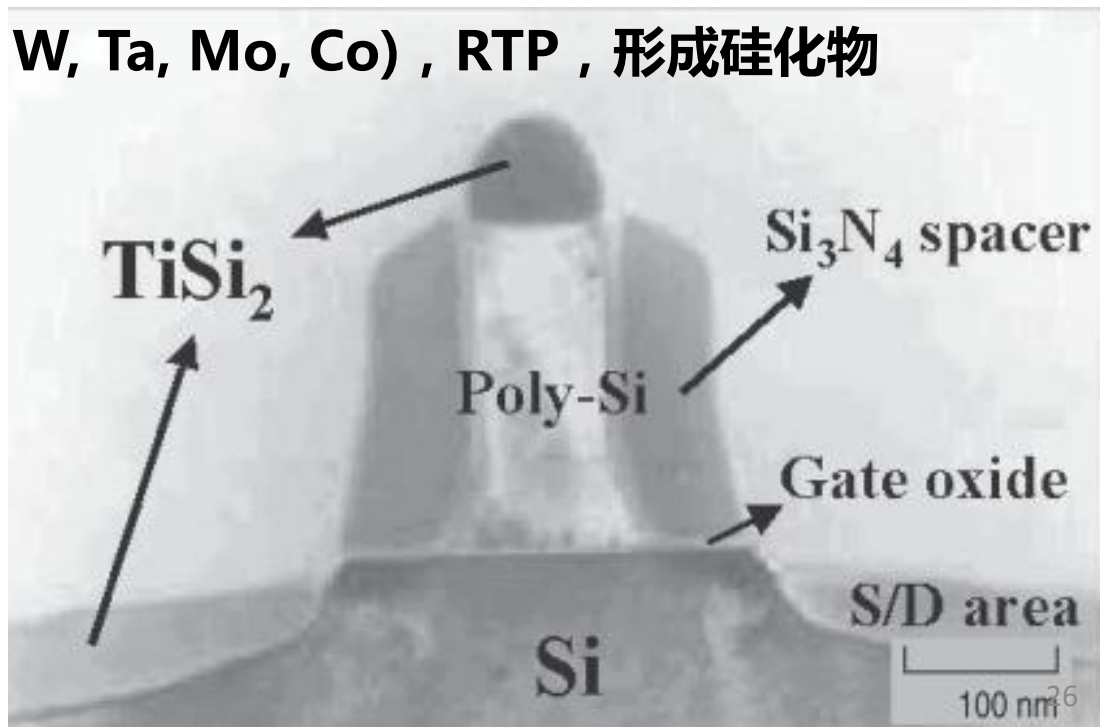
- 损耗、延迟等

低电阻率物质？

- 重掺杂的硅， 10^{-2} - $10^{-3}\Omega\cdot\text{cm}$
- 硅化物，silicides，电阻率低， TiSi_2 $13\mu\Omega\cdot\text{cm}$
- 硅化物，广泛应用于源漏极和硅栅极与金属之间的接触，
- 优势：与Si稳定接触；高温抗氧化性能好；

Si片表面，淀积金属薄膜(Ti, Pt, W, Ta, Mo, Co)，RTP，形成硅化物

- 使用RTP可减少杂质污染
- 精确控温



硅化物应用于集成电路制造，需具备下列特点

1. 低电阻， low resistivity;
2. 低接触电阻（Si）， low contact resistance to silicon;
3. 热稳定性， thermal stability;
4. 良好的抗氧化性， oxidation resistance;
5. 与Si的粘附性好， good adhesion to silicon;
6. 与 SiO_2 接触良好， 且反应最小， good adhesion to and minimal reaction with SiO_2
7. 低的界面应力， low interface stress,
8. 肖特基势垒或者欧姆接触， appropriate Schottky barrier height or Ohmic with heavily doped silicon (n^+ or p^+);
9. 良好的抗腐蚀性， high corrosion resistance;

RTP总结

- 1. 背景_问题的引出
- 2. 光源系统
- 3. 加热腔体设计
- 4. 晶圆片的温度均匀性
- 5. 温度测量
- 6. RTP用于杂质的快速激活
- 7. RTP用于制备超薄介质SiO₂
- 8. RTP用于硅化物生长

- 视频：离子注入 28分开始 快速热处理
- 补充：相干光源



4/6-inch Rapid Thermal Processing Furnace
B.G. Technical Support Ltd

如转载，请注明

哈尔滨工业大学（威海） 王华涛

补充知识：普通光源的发光机理

当原子中大量的原子（分子）受外来激励而处于激发状态。处于激发状态的原子是不稳定的，它要自发地向低能级状态跃迁，并同时向外辐射电磁波。当这种电磁波的波长在可见光范围内时，即为可见光。原子的每一次跃迁时间很短（ 10^{-8} s）。由于一次发光的持续时间极短，所以每个原子每一次发光只能发出频率一定、振动方向一定而长度有限的一个波列。由于原子发光的无规则性，同一个原子先后发出的波列之间，以及不同原子发出的波列之间都没有固定的相位关系，且振动方向与频率也不尽相同，这就决定了两个独立的普通光源发出的光不是相干光，因而不能产生干涉现象。

补充知识：相干光

两束满足相干条件的光称为相干光，相干条件

（Coherent Condition）：

- 这两束光在相遇区域：
- ①振动方向相同；
- ②振动频率相同；
- ③相位相同或相位差保持恒定

那么在两束光相遇的区域内就会产生干涉现象

补充知识：相干光源与非相干光源

若两光源所发出的两束光波叠加能产生干涉，则这两个光源称为相干光源；否则，称为非相干光源。

1. 普通光源：自发辐射

特点：同一原子发光具有瞬时性和间歇性、偶然性和随机性，而不同原子发光具有独立性。结论：普通光源发出的光波不满足相干条件，不是相干光，不能产生干涉现象。普通光源是一种非相干光源。

2. 激光光源：受激辐射

各发光原子的动作、步调是有秩序、有规则、彼此协调的。同一原子先后发射的各波列之间，以及空间上不同原子发射的各波列之间都具有确定的相位关系。激光有很好的相干性。

补充知识：获得相干光源的三种方法

a原理：波阵面分割法

将同一光源上同一点或极小区域（可视为点光源）发出的一束光分成两束，让它们经过不同的传播路径后，再使它们相遇，这时，这一对由同一光束分出来的光的频率和振动方向相同，在相遇点的相位差也是恒定的，因而是相干光。如，杨氏双缝干涉实验。

b方法：振幅分割法

一束光线经过介质薄膜的反射与折射，形成的两束光线产生干涉的方法。如，[薄膜干涉](#)。

c方法：采用激光光源

激光光源的频率,位相,振动方向,传播方向都相同。 [返回](#)