

# 微电子器件可靠性

Reliability of Microelectronic Devices

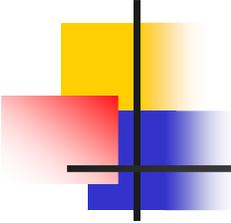
---

西安电子科技大学 XIDIDIAN UNIVERSITY

V2.0 © 2007 韩孝勇 Han XiaoYong

xyhan5151@yahoo.com.cn www.dianzichan.com

## 第四次课 失效分析



# 第四次课 失效分析

本次课主要内容:

第四章 失效分析

4.1 [失效模式与失效机理](#)

4.2 [失效模型](#)

4.3 [失效分析的内容与程序](#)

4.4 [微分析的物理基础](#)

补充材料: [失效分析图片](#)

本次课要点:

- 1、失效模式与失效机理的定义和区别;
- 2、了解几种失效模型;
- 3、掌握失效分析基本原则和程序;
- 4、了解微分析技术的物理基础。

# 4.1 失效模式与失效机理

## 4.1.1 失效分析的目的和意义

- 通过测试分析来寻找失效原因和机理的过程
- 了解 评价 改进 提高

## 4.1.2 失效模式及模式分布

- 失效模式是指失效的形式和现象，只表示器件是怎样失效的，不涉及为什么失效。
- 一般失效模式：开路、短路、无功能、参数漂移或退化等等。（一般由用户提出）

## 4.1.3 失效机理

- 是指器件失效的实质原因，说明器件是如何失效的，即引起失效的物理化学过程。（第3章讲过的各种失效机理）

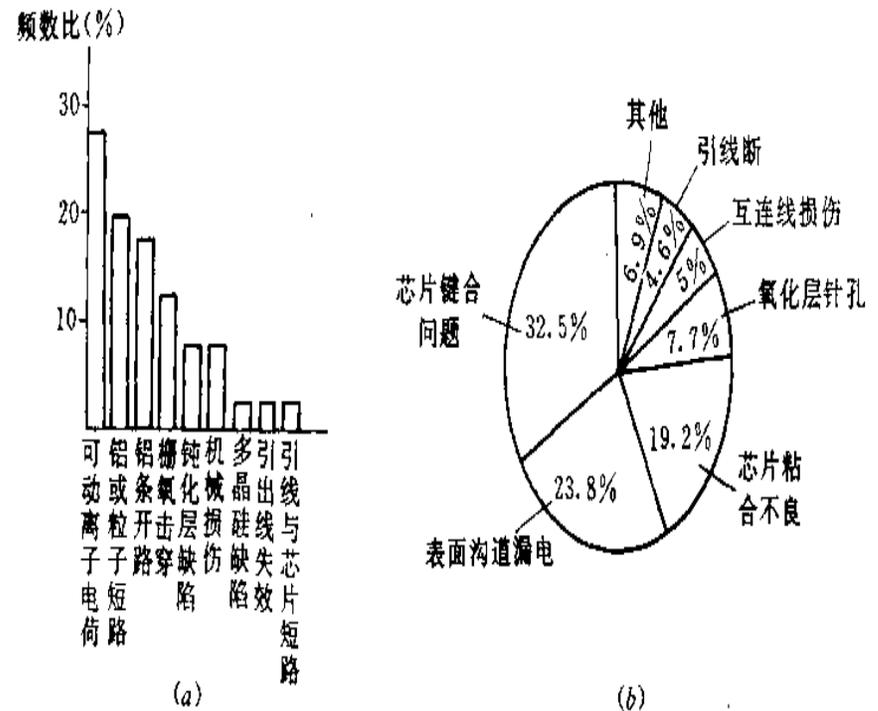
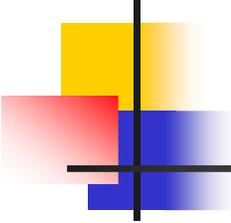


图 4.1 失效模式分布  
(a) 直方图; (b) 饼图



## 4.2 失效模型

---

4.2.1 应力—强度模型

4.2.2 Arrhenius模型

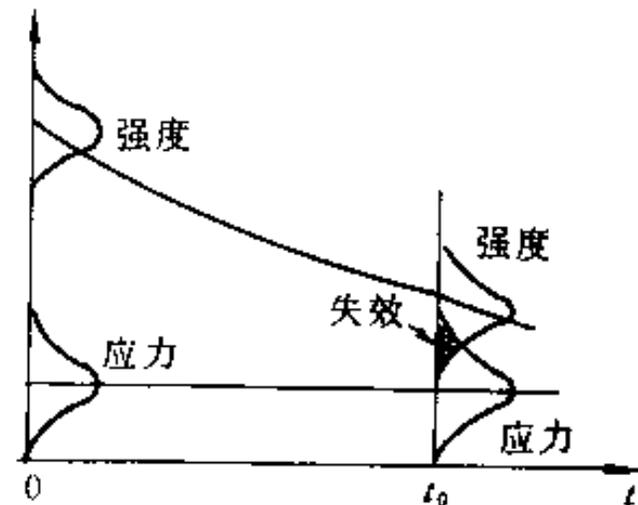
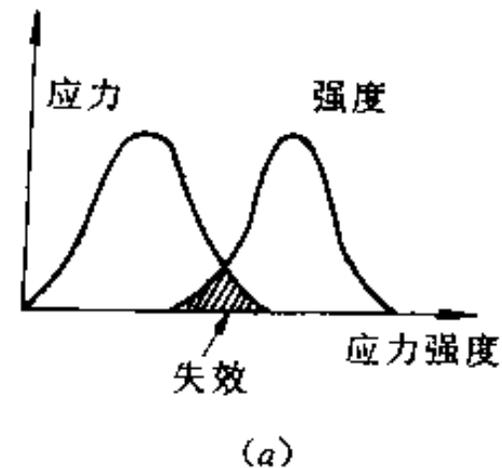
4.2.3 Eyring 模型

4.2.4 最弱环模型

4.2.5 累积损伤模型

## 4.2.1 应力—强度模型

- 应力大于能承受的强度而失效
  - 比如引线强度3g,挂5g就容易失效。
- 应力本不大,但器件老化,导致“偏大”
  - 比如比如引线强度3g,高温工作很长时间后再2.5g就失效。



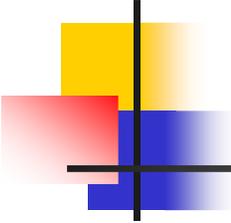
## 4.2.2 Arrhenius模型

- Arrhenius模型是在总结化学反应数据的基础上提出来的，说明反应过程中**反应速率与反应温度间的关系**。由于微观的分子、原子发生了物理的或化学的变化，导致在产品特性参数上的退化，当其积累到一定程度时即发生失效，退化所经历的时间即产品的寿命，目前已成功地应用于电子元器件的可靠性试验中。

Arrhenius模型也称Arrhenius公式

$$\frac{dM}{dt} = R(T) = Ae^{-\frac{E_a}{kT}}$$

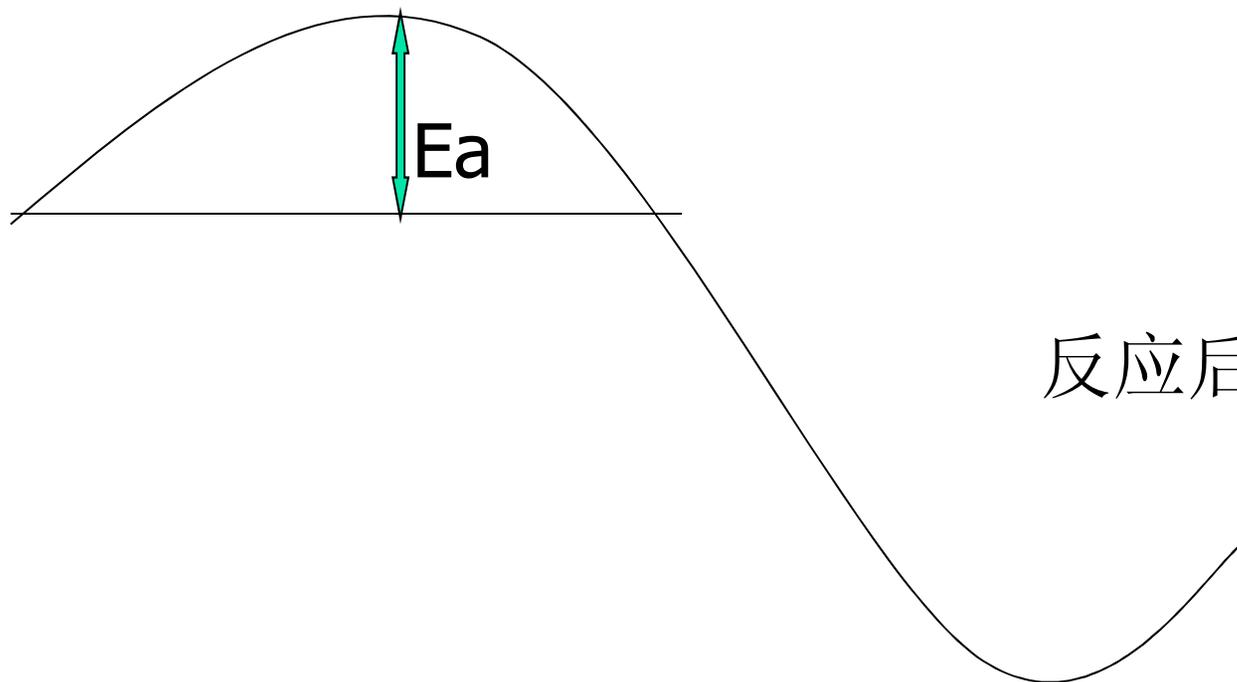
式中R(T)是温度T时的反应速率，A为一系数，E<sub>a</sub>为对应某种反应的激活能，k为波曼常数。



# 激活能 $E_a$

---

不反应状态



反应后状态

# Arrhenius模型

式中  $R(T)$  是温度  $T(K)$  时的反应速率,  $A$  为一系数,  $E_a$  为对应某种反应的激活能,  $k$  为 Boltzmann 常数。器件于时刻  $t_1$  处于正常状态  $M_1$ , 到时间  $t_2$  时处于失效状态  $M_2$ , 若温度  $T$  与时间无关, 则

$$\int_{M_1}^{M_2} dM = \int_{t_1}^{t_2} Ae^{-\frac{E_a}{kT}} dt$$

化简后

$$\ln t = a + \frac{b}{T}$$

有问题

$$b = \ln \frac{E_a}{k}$$

式中  $a$  为常数, (4.3) 式就是以 Arrhenius 反应速率为基础的器件寿命与温度应力  $T$  的关系。寿命  $t$  的对数与绝对温度的倒数成线性关系, 它在单对数坐标轴系统中为一直线, 由其斜率可求出激活能。器件由正常状态向失效状态转换过程中存在着能量势垒, 克服这种势垒所需要的能量就称做激活能。激活能来源于晶体结构中晶格点阵上的原子, 通过运动要达到另一点阵或间隙位置时所需的能量。引起器件失效的激活能大都在  $0.3 \text{ eV} \sim 1.6 \text{ eV}$  之间。激活能愈小, 表明进行这种反应的物理过程愈容易进行。

$$M_2 - M_1 = Ae^{-\frac{E_a}{kT}}(t_2 - t_1)$$

令  $\Delta M = M_2 - M_1, t = t_2 - t_1$ , 有  $t = \frac{\Delta M}{A} e^{\frac{E_a}{kT}}$ , 两边取对数得:

$$\lg t = \lg \frac{\Delta M}{A} + \frac{E_a}{kT} \lg e$$

令  $a = \lg \frac{\Delta M}{A}, b = \frac{E_a}{k} \lg e$ , 则上式变为:

$$\lg t = a + b \left( \frac{1}{T} \right)$$
$$\ln t = \ln \frac{\Delta M}{A} + E_a/kT = \text{常数} + E_a/kT$$

# Arrhenius模型

适用高温存储试验

通过 Arrhenius 模型的分析，它是基于下面两个假设：

① 试样的某个参数  $x$  的退化量  $D=f(x)$  是时间  $t$  的线性函数。

$$f(x) = R(T)t \quad (4.5)$$

$R(T)$  是方程的斜率，反映了参数退化量  $D$  随时间的变化速率即退化率，是温度的函数。

② 退化率  $R(T)$  的对数是绝对温度倒数的函数：

$$R(T) = Ae^{-\frac{E_a}{kT}} \quad (4.6)$$

若试验中采用不同的温度应力  $T_1, T_2$ ，其他条件不变，要产生相同的退化量，所需时间分别为  $t_1$  和  $t_2$ ，其比即为温度加速因子  $\tau$

$$\tau = \frac{t_1}{t_2} = e^{\frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} \quad (4.7)$$

加速系数：E大易加速；T1大易加速

$\tau$  反映了施加不同温度应力时，样品寿命相对变化的倍数。显然，加速因子的值与所施加的应力大小和表征产品失效机构的激活能有关。

这些假设表明，若微电子器件的某个参数，通过某种变换，能使其随时间变化的规律呈线性关系，而且在所讨论的温度范围内，不改变其失效机理，就可用 Arrhenius 方程来描述其寿命过程。

## 4.2.3 Eyring 模型

### 4.2.3 Eyring 模型

在 Arrhenius 模型中，只考虑温度应力对产品的物理、化学性质变化的影响。事实上，很多物理现象和化学反应过程，除与温度有关外，还与很多非温度应力如电压、湿度、机械应力等密切相关，这就要用到 Eyring 模型。它也是一种反应速率论模型，它描述了温度、湿度、电压、电流、振动等多种应力和寿命之间的关系，其反应速率  $R(T, S)$  为：

$$R(T, S) = R_0 f_1 f_2 \quad (4.8)$$

式中  $T$  为温度应力， $S$  为非温度应力， $R_0 = a \frac{k}{h} T e^{E_a/kT}$  是只有温度应力时的艾琳反应速率，

$h$  为普朗克常数， $f_1 = e^{CS}$  是考虑由非温度应力存在而对能量分布的修正因子， $f_2 = e^{DS/kT}$  是考虑到由非温度应力存在对激活能的修正因子； $a, C, D$  是待定常数。

## Eyring 模型

若令  $\varphi=C+D/kT$ ，则器件某参数的退化量可表示为

$$f(x) = R(T \cdot S)t = R_0 e^{\varphi S} t \quad (4.9)$$

考虑到有非温度应力时的加速系数为

加速系数

$$\tau = \frac{t_1}{t_2} = \frac{R_{02} e^{\varphi_2 S_2}}{R_{01} e^{\varphi_1 S_2}} \quad (4.10)$$

若试验温度相同，只存在非温度应力时的加速系数为

$$\tau = e^{\varphi(S_2 - S_1)} \quad (4.11)$$

非温度应力通常可用函数关系表示，如恒定温度下的电压应力  $U$  可表示为  $S = \ln U$ ，此时 Eyring 模型的加速系数为

$$\tau = e^{\varphi(\ln U_2 - \ln U_1)} = \left( \frac{U_2}{U_1} \right)^\varphi$$

逆幂律  $t=1/KV^c$   
寿命与电压的某个指数成反比

这即是逆幂律关系。此时寿命与电压应力间关系则为

$$\ln t = a + \frac{b}{T} - \varphi \ln U \quad \text{电压越大，寿命越短} \quad (4.13)$$

此式可用于介质材料的寿命与非温度应力如电压等的关系。

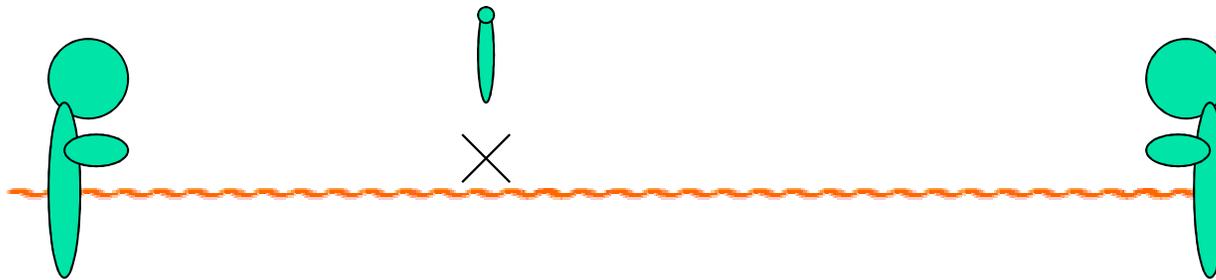
如果非温度应力为湿度，若相对湿度为  $R_H$ ， $S = \ln R_H$ ，此时

$$\ln t = a + \frac{b}{T} - \varphi \ln R_H \quad \text{湿度越大，寿命越短} \quad (4.14)$$

当器件在高温高湿下工作，其 Au-Al 或 Al-Al 键合点处由于电化学反应而产生腐蚀、剥离，此时寿命就可用本模型来描述。

## 4.2.4 最弱环模型

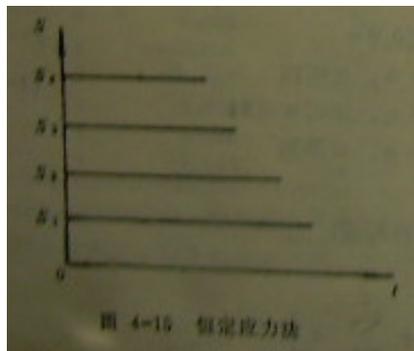
- 串联模型——绳子从最细处断
- 各元器件都肩负着不可替代的作用，则一个有问题，就整体失效。



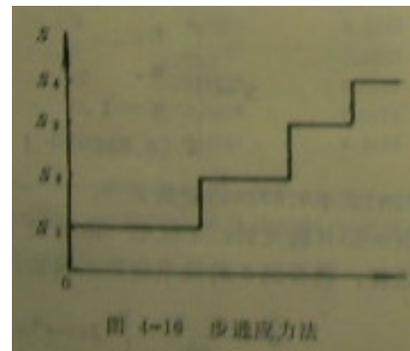
## 4.2.5 累积损伤模型

- 有的失效可恢复（比如雪崩击穿），有的不可恢复（比如ESD），不可恢复的每次损伤都有影响，累计起来，最终导致器件失效。
- 步进应力和序进应力试验就是以这种模型为依据。  
(应力不增加额外的失效模式)

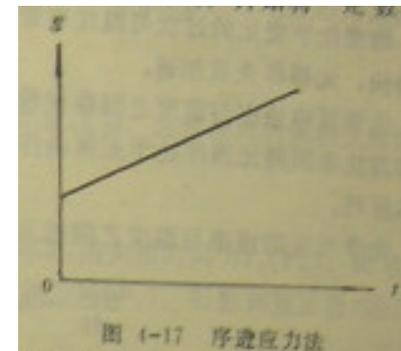
恒定应力

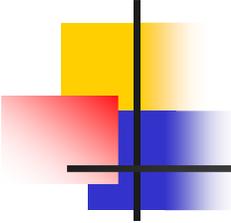


步进应力



序进应力





## 4.3 失效分析内容和程序

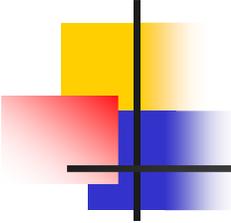
---

4.3.1 开封前

4.3.2 开封

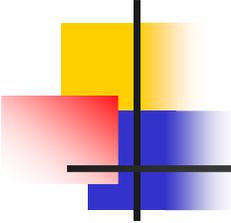
4.3.3 开封后

4.3.4 总结



# 失效分析程序的基本原则

1. 先调查、了解与失效有关的情况(器件类型、应力条件、失效现象等)后分析失效器件。  
(先望闻问切再开刀)
2. 先做外部分析,后做内部(解剖)分析。
3. 先做非破坏性分析,后做破坏性分析。



## 4.3.1 开封前

(1)对失效器件本身(线路、结构、版图、工艺、性能、材料等)应作全面了解。

例：不是自己的器件

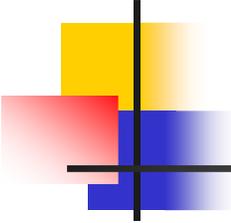
(2)失效情况的调查。包括：

- 失效器件类型、外壳、封装类型、生产厂、生产日期和批号；
- 使用单位，使用器件的设备名称、台号、失效部位，累计运行时，功能；
- 失效时的环境(调试、运行、高温、振动、冲击、验收或现场使用)，失效时间，失效现象(开路、短路、无功能、参数变化、判别标准等)，失效判断人。

例：周围有高压线

(3)复测电特性，验证失效情况。所得结果是否与所报告的失效情况是否相符，不符时要考虑是否器件特性改变？是时好时坏的问题，还是原来数据有误？

例：拿回来测正常



## 4.3.1 开封前

(4)初步电测试。分功能测试和非功能测试，前者对全部电参数进行测试，后者为脚与脚之间的测试。并与同类正常器件比较，由差别估计失效的部位与原因。

**例：VGG未工作**

(5)外观镜检，目检或在至少放大30倍的显微镜下进行。内容包括外引线、电镀层、锡焊等，有无机械损伤，腐蚀，标记完整性如何等。对任何异常情况，应进行拍照记录。

(6)对管壳进行密封性检查，是否存在漏气。

(7)必要时进行x射线照相，以检查器件结构是否正常，有无多余物存在，也可以进行管壳内水汽含量分析，判别失效是否与水汽有关。

(8)失效模式的分类与统计。

## 4.3.2 开封

- 根据器件的结构和封装形式，采取不同方法，确保不损伤晶片芯片的表面，以便进行随后的观察和测量。

**(1)金属管壳**，可用金属管壳开启器或机械方式打开

**(2)陶瓷封装**，将样品底座夹紧，在盖板密封处放一直到盖板逐步松开、分离。也可对封接处用挫刀或砂纸研磨，待磨薄后或出现小孔时，用尖针插入，将盖板撬起。

**(3)塑封器件：**

①使用发烟硝酸(70℃—80℃)或硫酸(200℃—250℃)溶解，用去离子水清洗，无水乙醇脱水。

②利用氧等离子体进行干法腐蚀，将环氧树脂裂解变成粉末。

例：科大开封

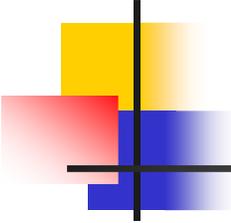
## 4.3.3 开封后

例：划伤、邦伤

**(1) 内部镜检** 用立体显微镜或高倍显微镜检查芯片，确认内部材料、设计、结构、工艺上是否有误用、缺陷、或异常情况，是否有烧毁、腐蚀迹象，链合丝的形状、尺寸、位置是否正确，芯片有无裂纹、外来异物，颜色是否正常，铝条是否有电迁移、发黑、长白毛、出现紫斑等现象。特别要观察失效部位的形状、尺寸、大小、颜色、结构等。必要时要进行拍照记录。

**(2) 电学测试** 与开封前测试结果加以比较，是否有改变，管壳内是否有水汽的影响。进一步可将表面氧化层、铝条去掉，用机械探针扎在有关节点上进行静态(动态)测试、判断被隔离部分是否性能正常，分析失效原因。

例：扎针



## 开封后

各种涂层或薄膜可用不同方法去除。

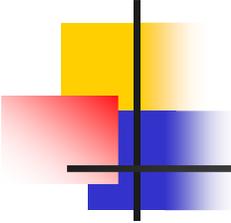
- 对芯片表面涂层可用化学法腐蚀去除。
- 钝化层可用氦等离子体刻蚀，对SiO<sub>2</sub>及PSG层也可用稀氢氟酸腐蚀等；
- 铝层 用激光束切断，或用稀硫酸(或盐酸)溶去。

**(3)断面观察** 对失效可疑部位如PN结、芯片断面、管壳封接处等，可取下相关部分浇入石蜡或塑料中，制成磨片。对磨片经过研磨、抛光、腐蚀及染色等步骤，将观察目标暴露出来，在金相显微镜下观察、拍照。

**(4)必要时进行微区表面分析。**

例：镊子戳破

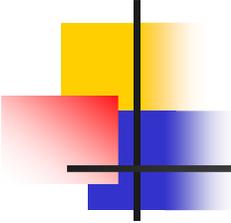
例：EMMI、LC、SEM



## 4.3.4 总结

---

- 整理分析试验结果，提出分析报告，对失效原因作出结论，并据此提出改进解决措施。



# 实用微电路失效分析程序

## 1、失效背景材料收集与分析：

- 样品结构，生产单位，时间，批号等
- 失效前样品的经历（筛选 运输 工作）
- 同类产品的主要失效模式和机理
- 失效后样品的经历

## 2、外貌观察：粘污，变形，变色，烧焦等；

## 3、失效现象复现；

## 4、外壳清洗，再做3；

## 5、加电测试可测特性：管脚间电流电压与正常比较；电源拉伸；

## 6、高低温测试；

## 7、X光照相；

## 8、做应力筛选后再做电测；

## 9、检漏；

（以上为非破坏性分析）

## 10、管壳内部气氛分析（打孔）；

## 11、开帽目检；

## 12、复测电性能和失效现象；

## 13、真空烘烤后再电测；

## 14、红外热像；

## 15、微探针切割测试；

## 16、剥层微分析；

## 17、结论验证（失效再现，是否为单一失效模式？）。

## 18、写报告

## 4.4 微分析技术物理基础

- 利用入射束（电子、离子、光）入射到样品表面，入射束与表面原子或晶体相互作用，调制入射束或激发出带有试样信息的二次粒子，通过一定的方法检测这些信息，就可以知道试样的组成和状态。

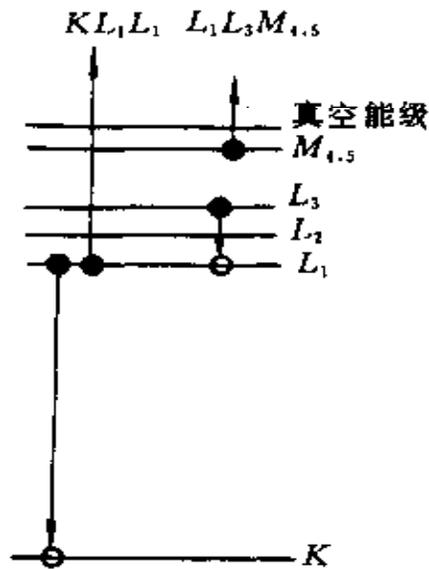


图 4.3 俄歇电子发射示意图

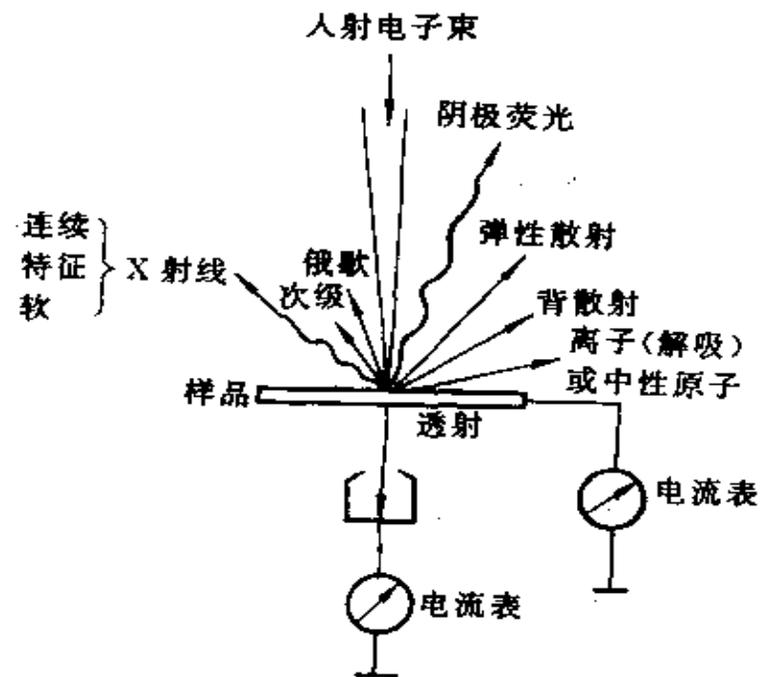
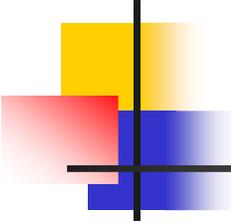


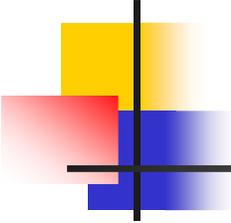
图 4.4 入射电子在样品真空侧产生的各种信息示意图



# 各种电子光子信息

---

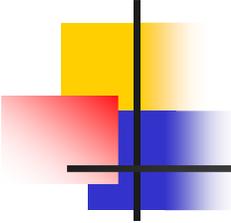
- 弹性散射——只改变方向不损失能量
- 非弹性散射——改变方向也损失能量
- 背散射电子——进入内部后基本能保持能量而逸出
- 二次电子——打出来的内部原子的表层电子
- 俄歇电子——被激发的外层电子回到内层后剩余的能量激发出来的外层电子。
- X射线——被激发的外层电子回到内层后剩余的能量激发出来的光子



# 广州5所赛宝分析中心图片

---

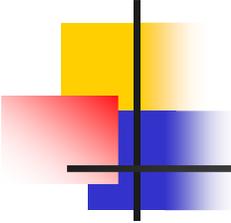
- 赛宝分析中心图片



# 香港科技大学分析图片

---

- 香港科大分析图片



# 本次课完

---

- 回顾讲过的内容。