

第五章 微电子芯片的失效分析

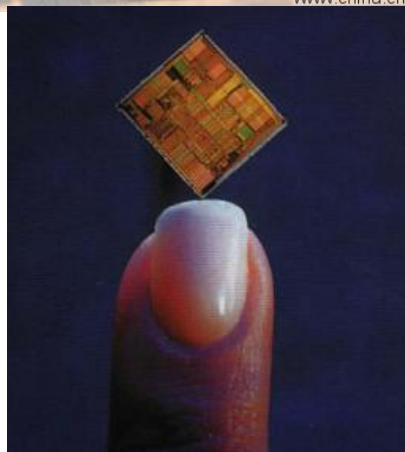
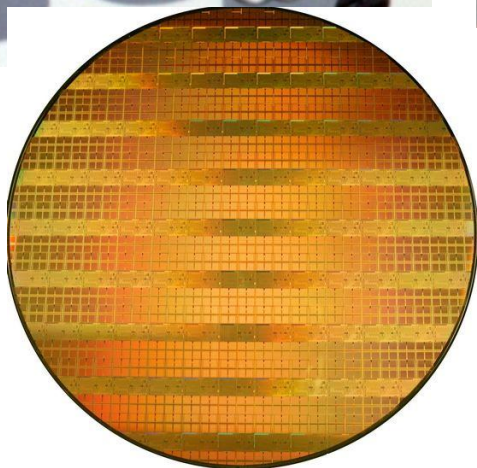
江素华

复旦大学材料科学系

内容提要

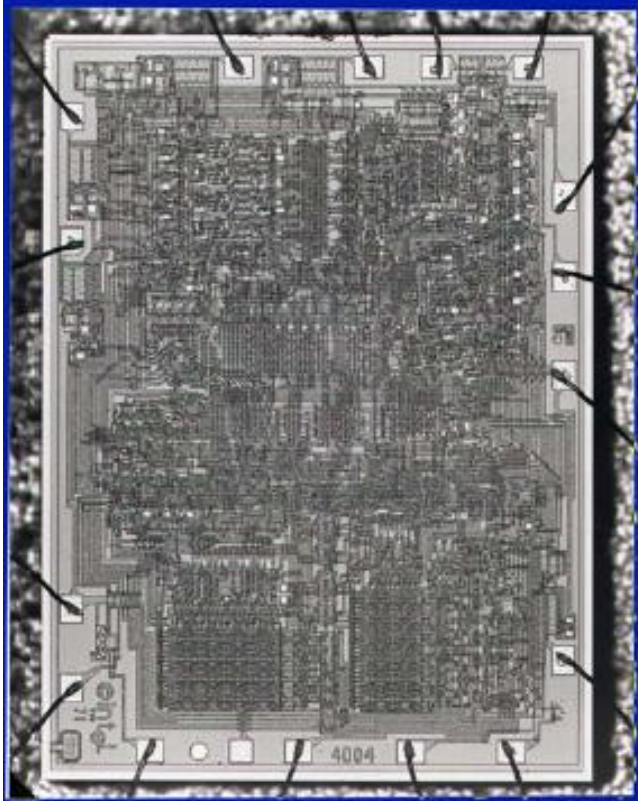
1. 芯片结构及元器件工作原理
2. 芯片失效机理
3. 芯片失效分析技术

芯片的制造：单晶、硅片、晶圆、芯片、封装、组装



集成电路的发展

FIRST MICROPROCESSOR
(4004 by Intel 1971)

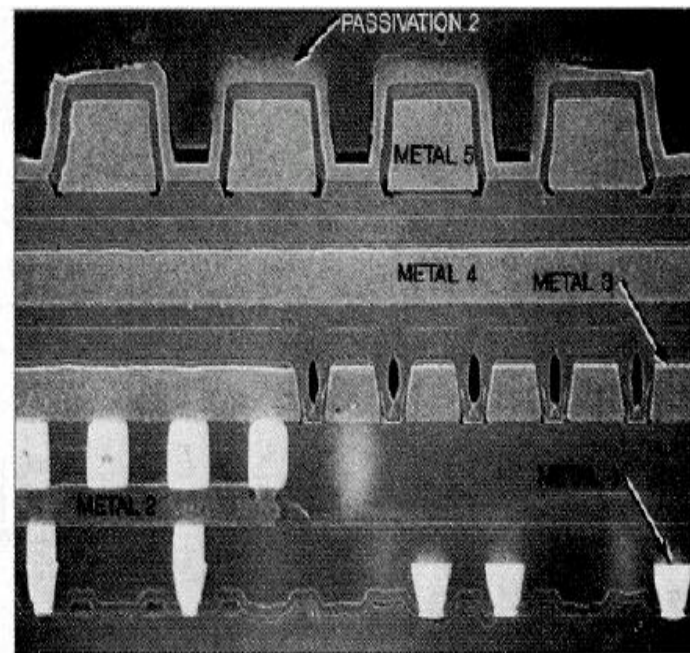
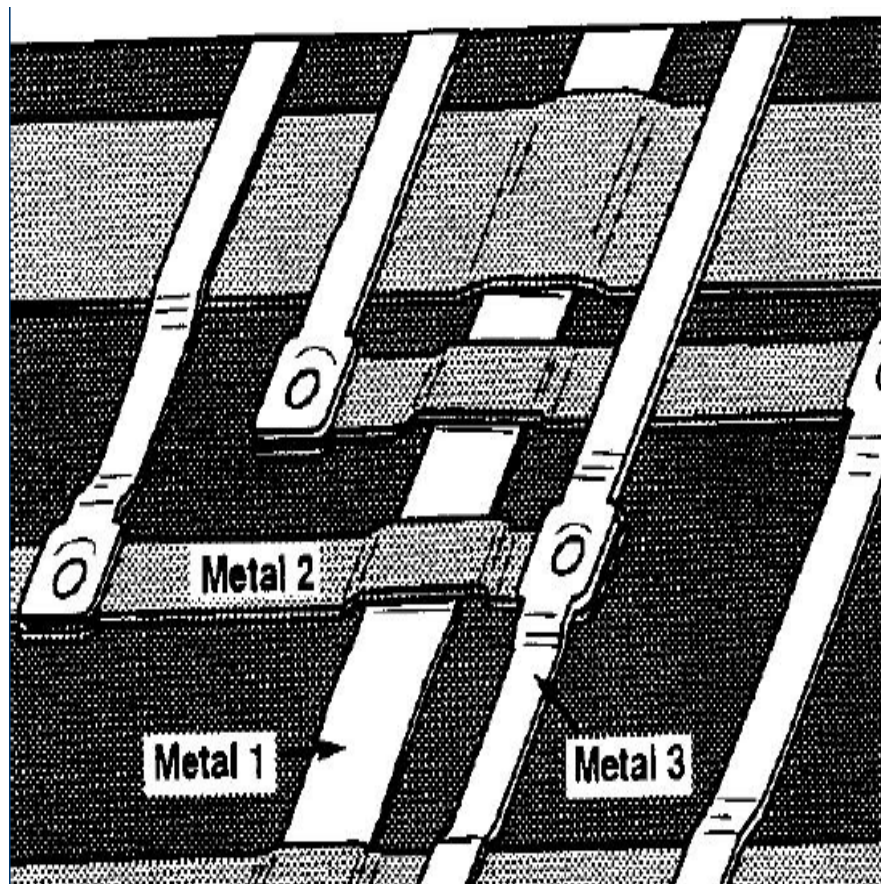


PENTIUM 4

0.18 μ m 42 million components 1.7 GHz

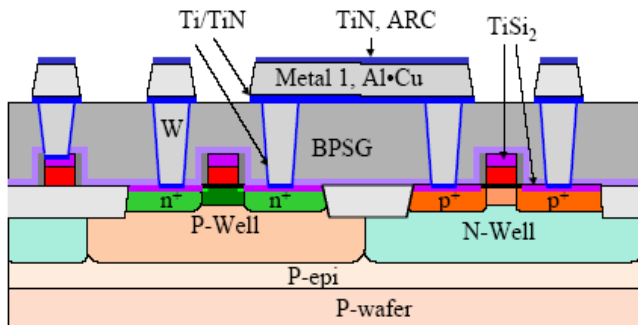


集成电路的发展



- Actual cross-section of a modern microprocessor chip. Note the multiple levels of metal and the planarization.

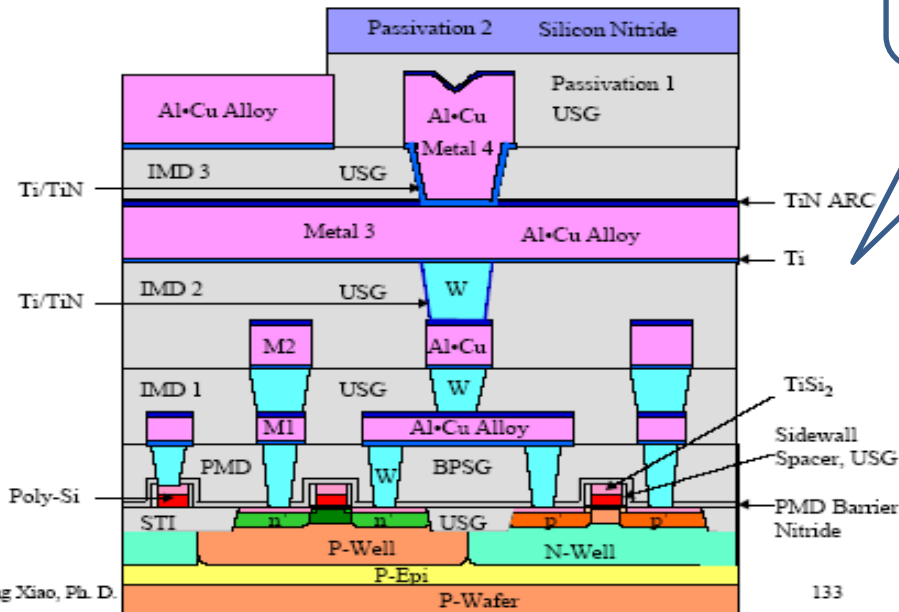
CMOS: Standard Metallization



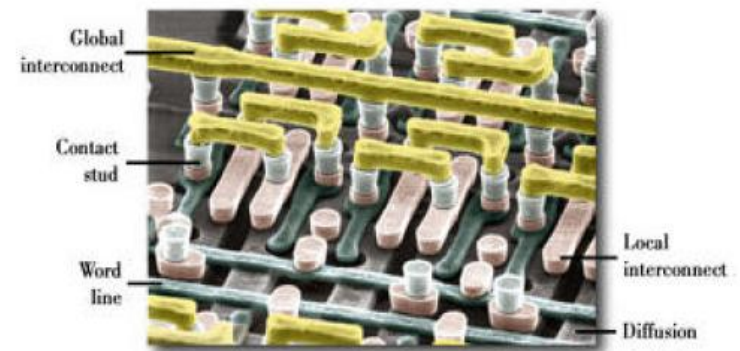
补偿性超效应晶体管器件结构剖面示意图

芯片多层互联线结构剖面示意图

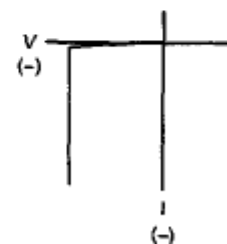
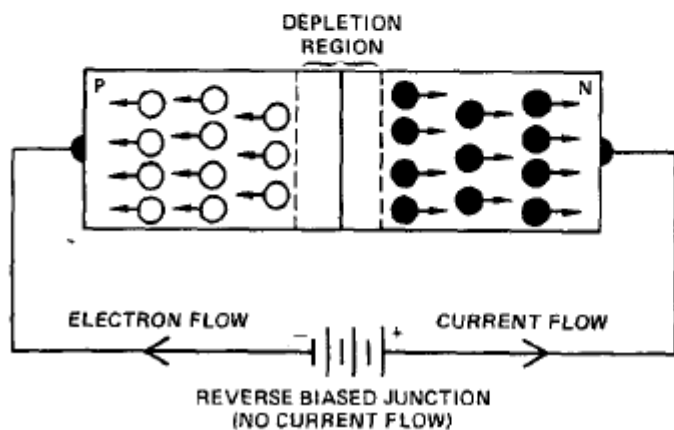
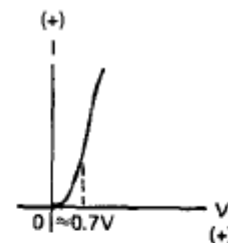
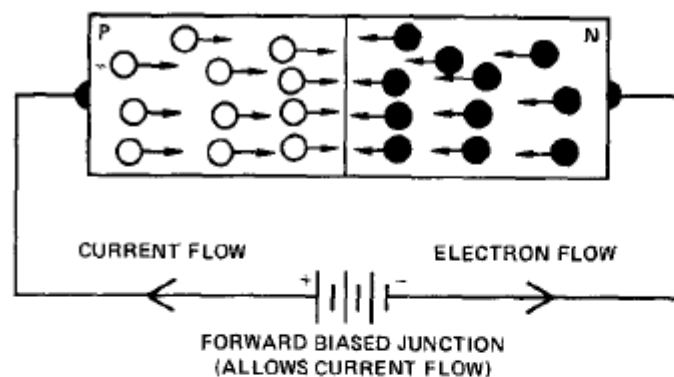
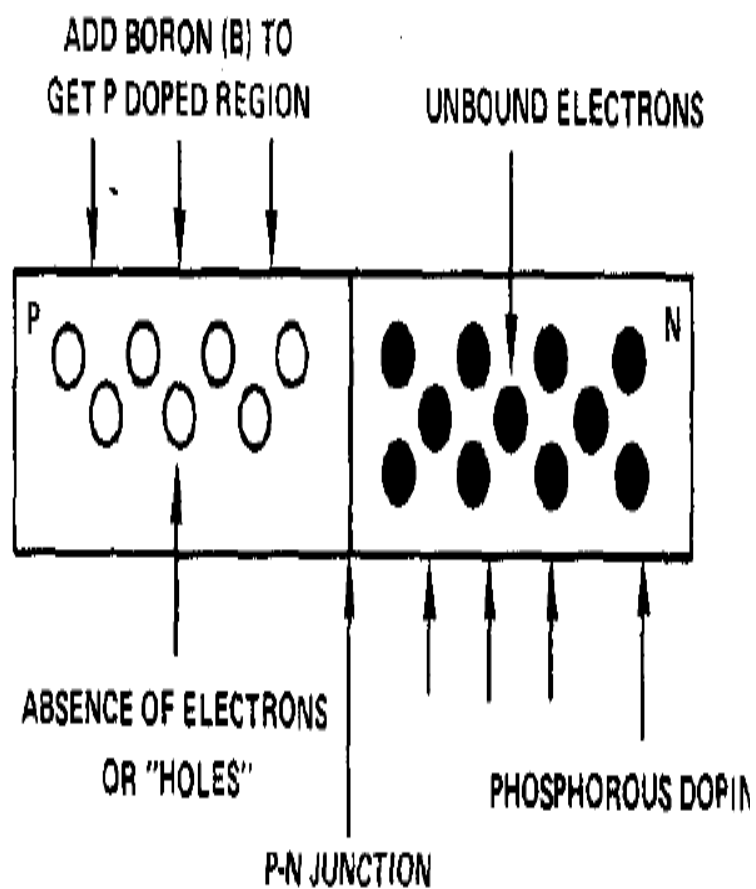
芯片互联结构实物照片



Applications: Interconnection

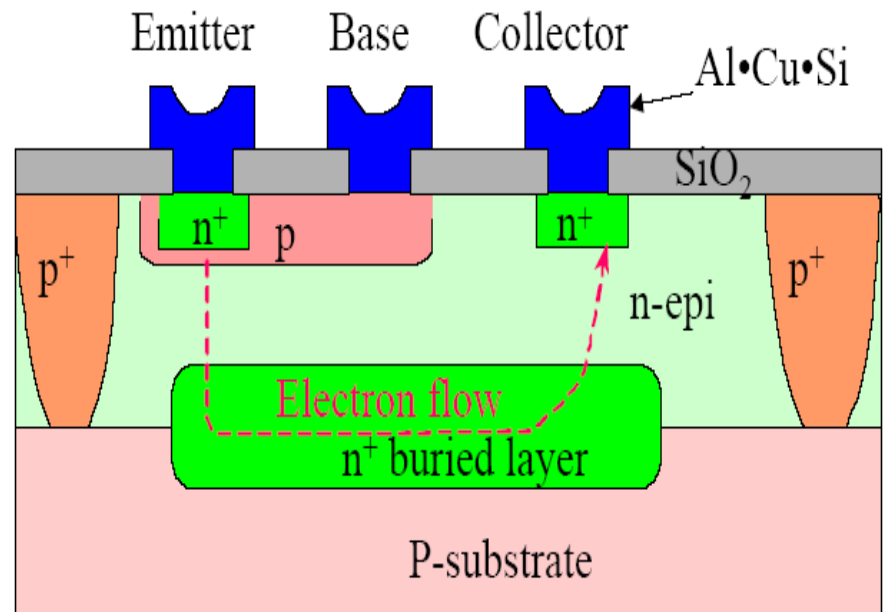
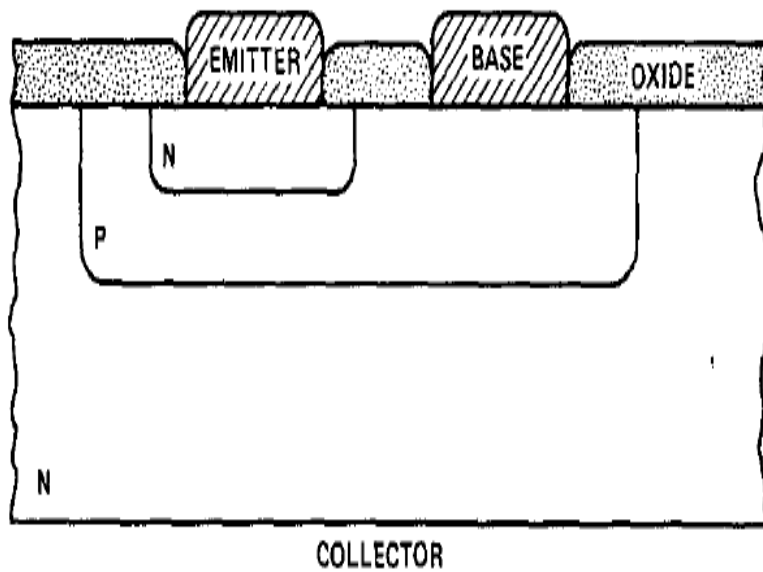


双极型晶体管原理

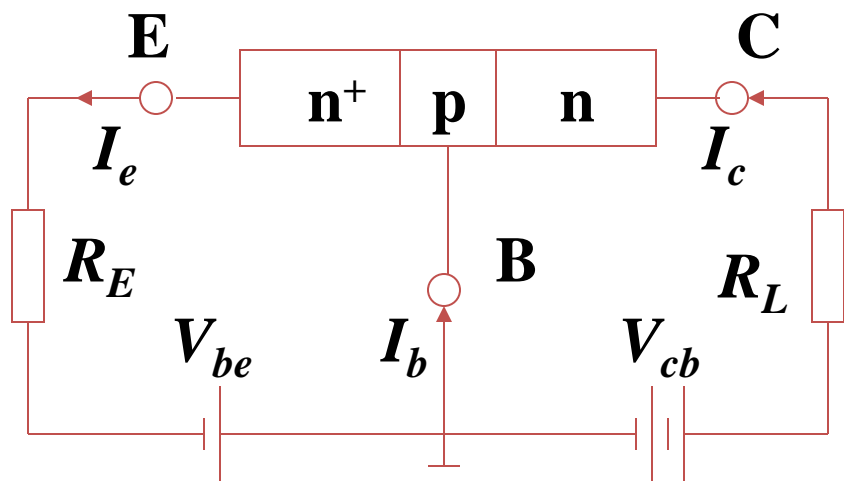


双极型晶体管工艺

NPN Bipolar Transistor



双极型晶体管工作原理

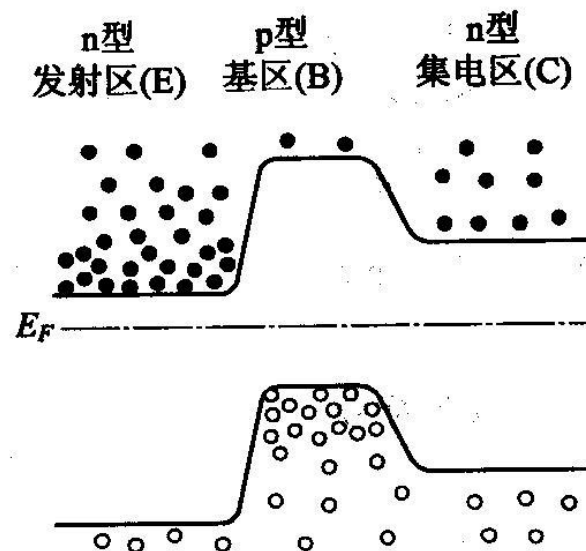
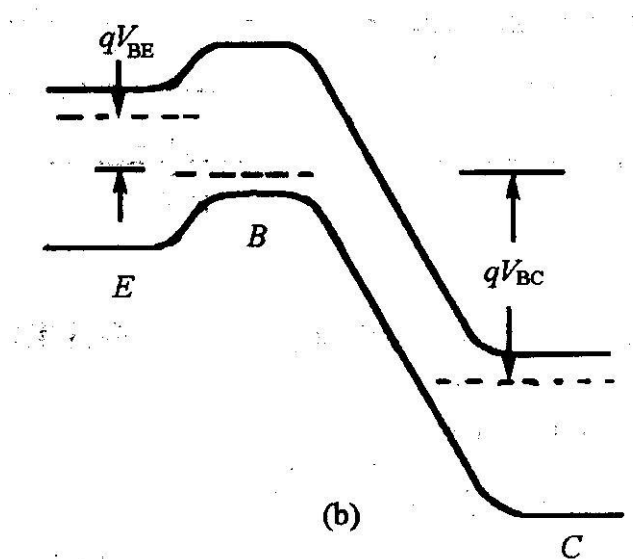


放大条件:

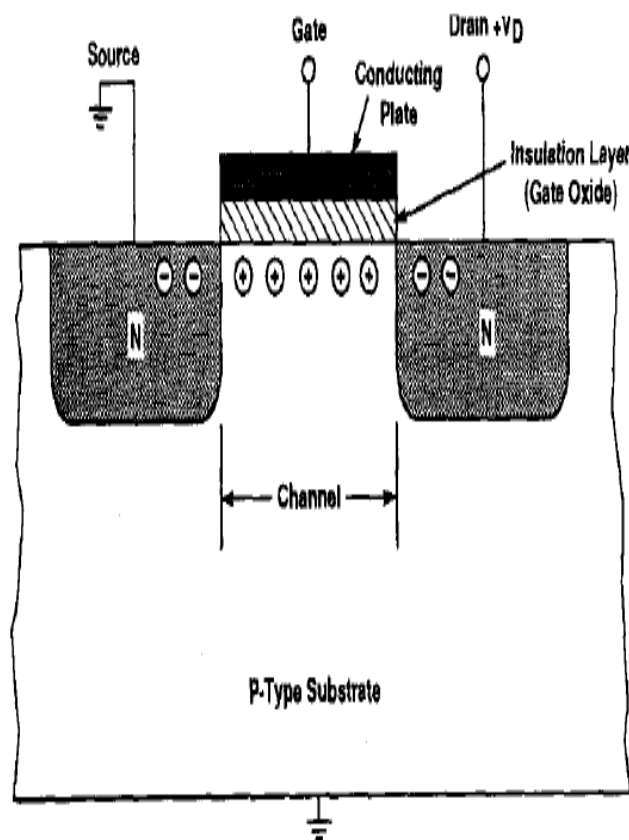
$$1^\circ W_b \ll L_{nb}$$

2° 发射结正偏

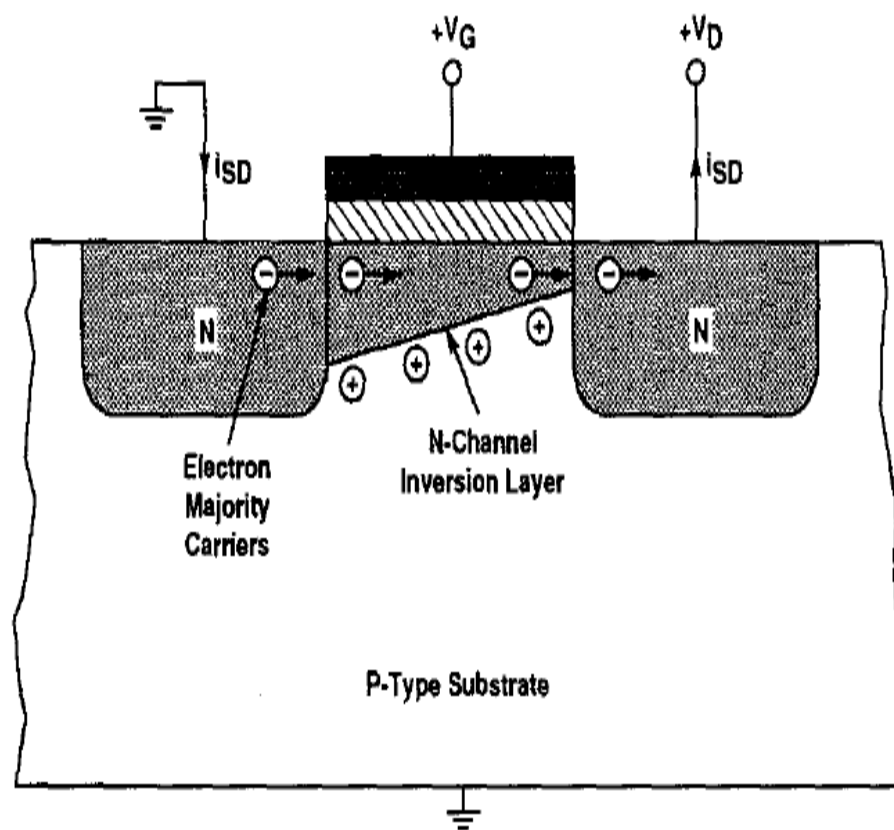
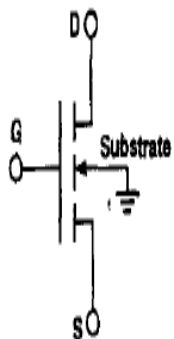
3° 集电结反偏



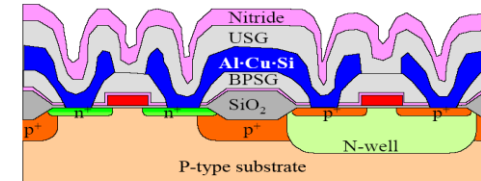
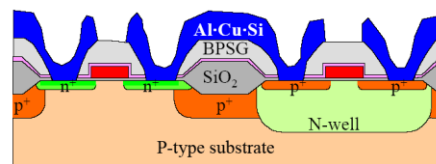
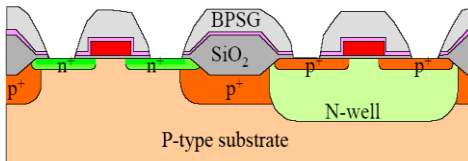
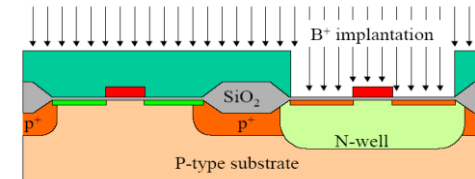
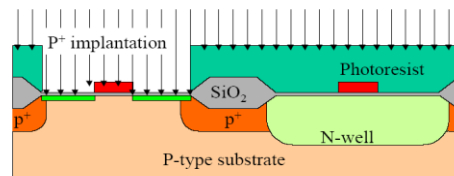
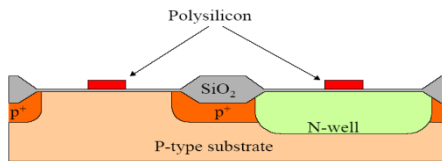
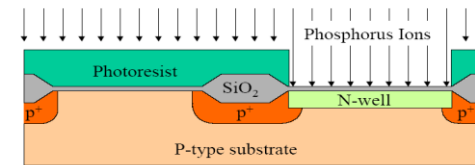
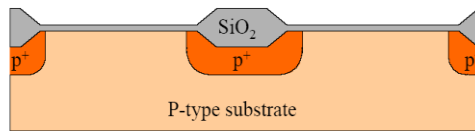
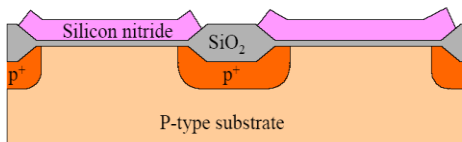
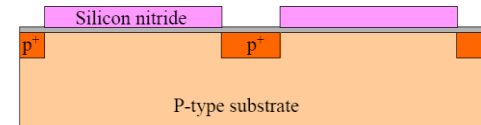
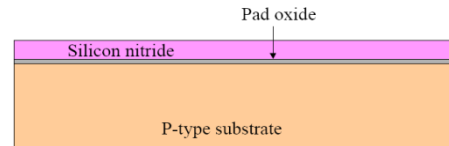
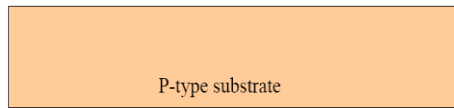
MOS场效应晶体管原理 (NMOS)



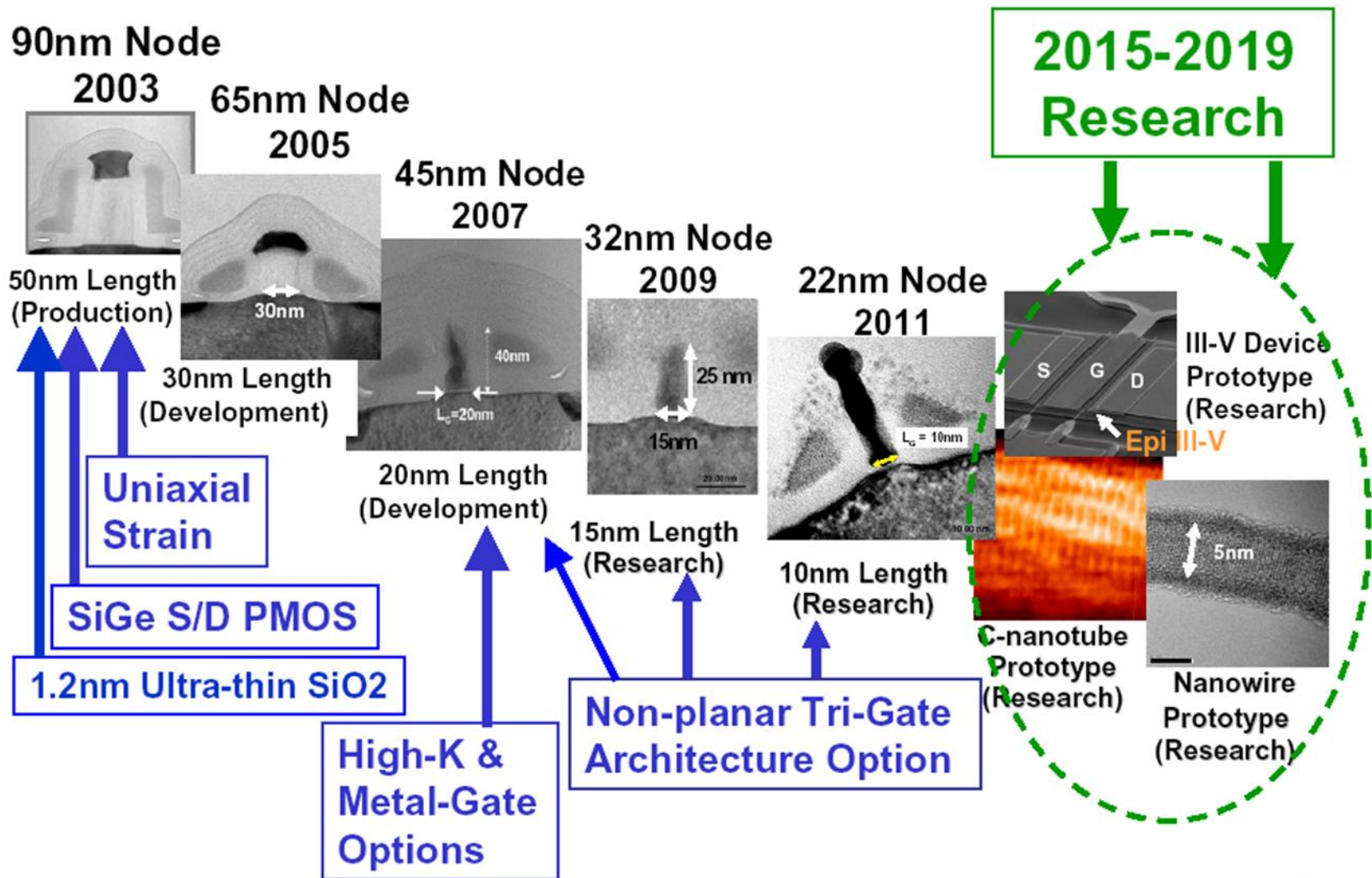
Schematic Symbol



CMOS 工艺流程



器件的不断小型化



2. 芯片的失效机理

2.1 氧化层击穿

2.2 热载流子效应

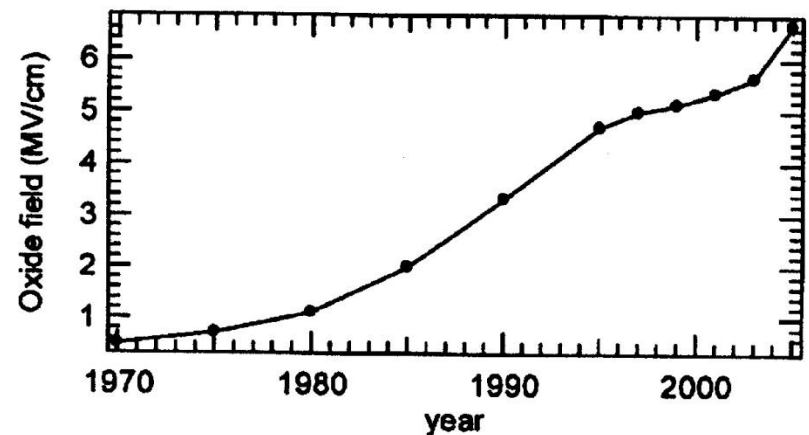
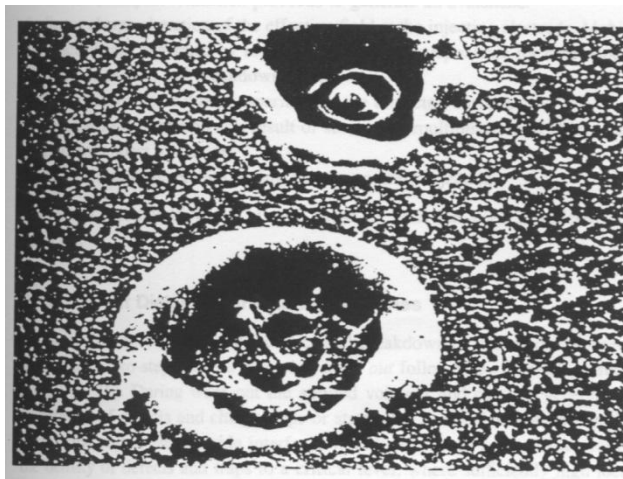
2.3 薄膜的相互扩散

2.4 静电放电及辐射

2.5 金属互联电迁移

2.1 氧化层击穿

- 在强电场作用下，绝缘体中出现局部的低阻通道。
- 随着氧化层厚度减小，电场增加，击穿问题成为研究热点。



g. 1. The gate oxide field in CMOS technologies as a function of the year.

介质薄膜的击穿过程

- 一般击穿分成两个过程：
 - 电击穿：强场下载流子雪崩，产生大量电子、空穴，电阻突降。
 - 热击穿：局部电流密度增大，温度升高产生热奔驰，使薄膜熔化或产生其他损坏。

介质薄膜电击穿分类

- 非本征击穿——其击穿强度较低。
- 本征击穿是指材料自身特性所限制而发生的击穿——击穿强度较高。

Table 6-2 Dielectric Breakdown Strengths for Ceramics and Glasses

| Material | Form | Thickness (cm) | Temperature °C | Breakdown field (10^6 V/cm) |
|--------------------------------|----------------------|--------------------|----------------|--------------------------------|
| Al_2O_3 | Anodized film | 3×10^{-6} | 25 | 7.0 |
| 99.5% Al_2O_3 | Polycrystalline bulk | 0.63 | 25 | 0.18 |
| Alumina porcelain | | 0.63 | 25 | 0.15 |
| High-voltage porcelain | | 0.63 | 25 | 0.15 |
| Low-voltage porcelain | | 0.63 | 25 | 0.03 |
| Lead glass | | 0.02 | 25 | 0.25 |
| Lime glass | | 0.004 | 25 | 2.5 |
| Borosilicate glass | | 0.0005 | 20 | 6.5 |
| Quartz crystal | | 0.005 | 20 | 6.0 |
| Quartz fused | | 0.005 | 20 | 6.6 |
| TiO_2 (optic axis) | | 0.01 | 25 | 0.02 |
| (\perp optic axis) | | 0.01 | 25 | 0.12 |
| BaTiO_3 | Single crystal | 0.02 | 0 | 0.040 |
| | Polycrystal | 0.02 | 25 | 0.12 |
| SrTiO_3 | Single crystal | 0.046 | 25 | 0.41 |
| PbZrO_3 | Dense polycrystal | 0.016 | 20 | 0.079 |
| PbZrO_3 | (10% porosity) | 0.016 | 20 | 0.033 |
| Mica | (muscovite crystal) | 0.002 | 20 | 10.1 |
| SiO_2 | thin film | | | 11 |
| Si_3N_4 | thin film | | | 10 |
| SiN (H) | thin film | | | 6 |

Data from G. C. Walther and L. L. Hench, eds of Physics of Electronic Ceramics, Part A, Dekker, New York

关于氧化层击穿理论的发展

1. 电子贡献的总能量而非单个电子的能量。
2. 热奔驰现象。
3. 电子和原子晶格之间的碰撞而产生的电子倍增或雪崩现象。
4. 阴极场发射电荷注入。
5. 可动电荷。
6. 介质表面粗糙度引起的电场增大。
7. 由碰撞电离引发的内部电场畸变。
8. 界面态

氧化层导电机制

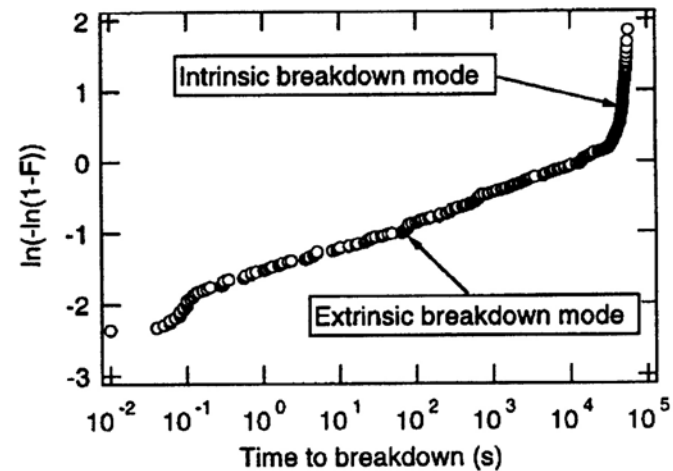
注入氧化层的电流有：

1. 热载流子电流
2. 场助隧道电流(Fowler-Nordheim F-N电流)
3. 直接隧道电流
4. Poole-Frenkel 电流
5. 陷阱辅助隧道电流(弹性或非弹性)

随时间击穿TDDDB

当样品上施加一个低于其击穿的电压时，经过一段时间后，这些样品也陆续发生击穿。这种现象称为与时间有关的介质击穿

**TDDDB Time
Dependent Dielectric
Breakdown**



超薄氧化层的失效

- 应力漏电
- 软击穿
- 负偏不稳定性

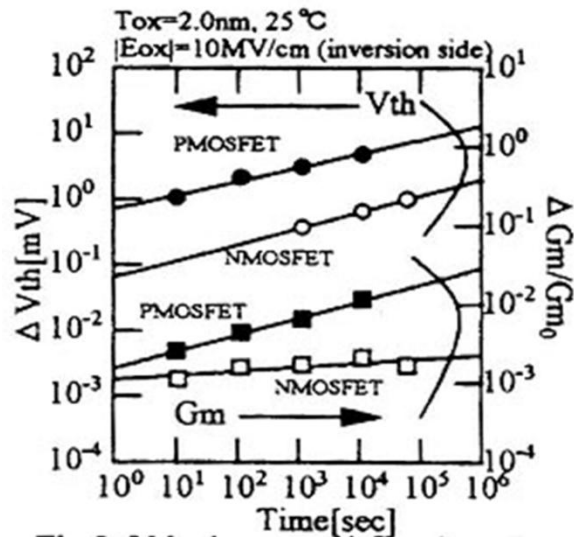
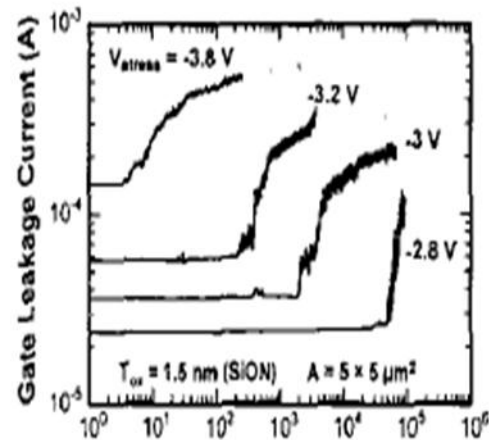
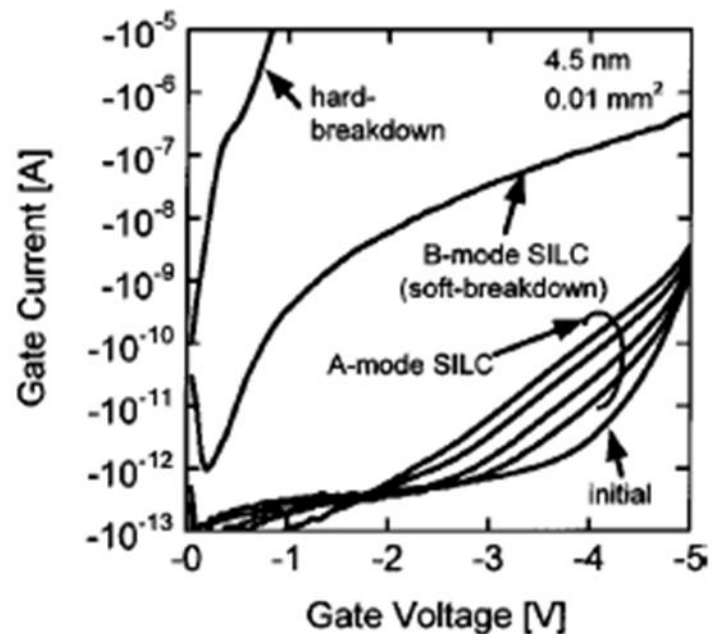


Fig. capal stress



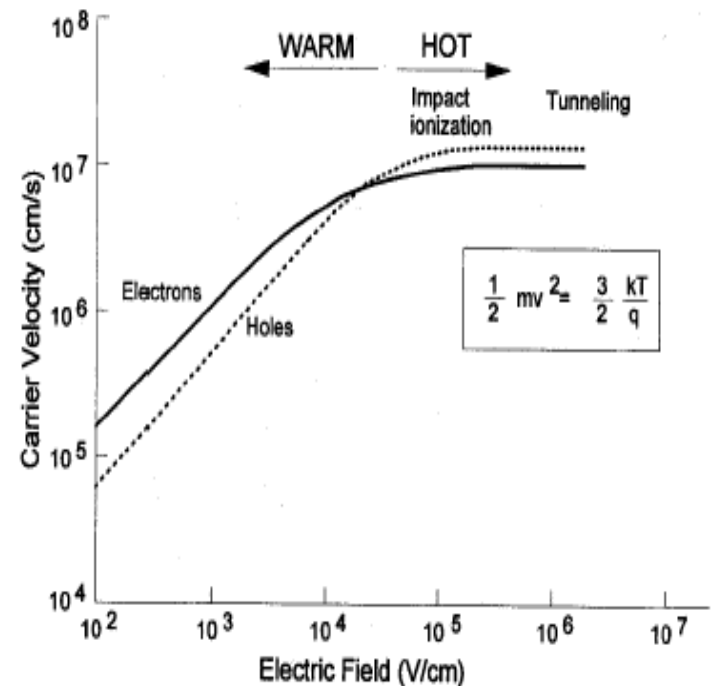
2.2 热载流子效应

什么是热载流子：

电子能量的大小是电场强度的函数。

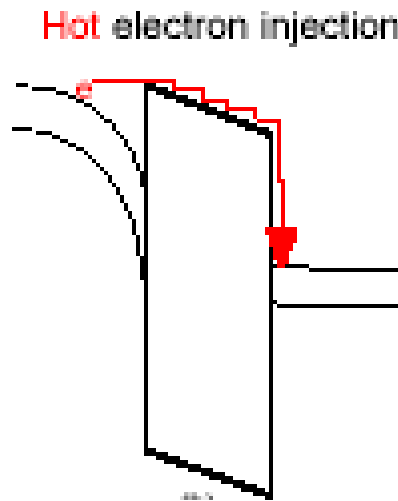
按照载流子所处的电场强度：

低于 10^7V/cm 时称为暖电子，
高于 10^7V/cm 时称为热电子。



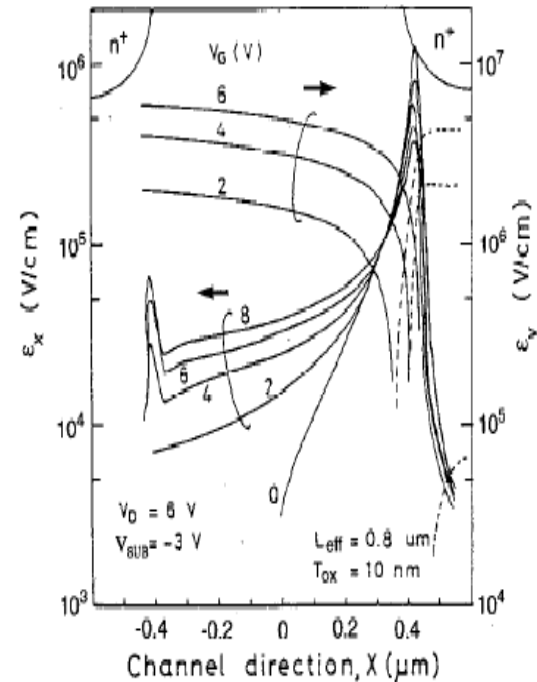
热载流子效应

载流子的能量超过Si-SiO₂的势垒高度(3.5eV)时,载流子可能直接注入进入SiO₂. 在SiO₂产生空间电荷,影响器件的性能,这种效应称为热载流子效应。



MOS器件的夹断效应

NMOS器件出现夹断效应后，有效沟道长度减小。
 V_D 都降在夹断区上，电场的峰值点在夹断区边缘处。



Potential variation along the channel for MOS transistors with 2.5 and 0.5 μm channel lengths. The 0.5 μm device shows DIBL effect.

NMOS 器件中的热载流子

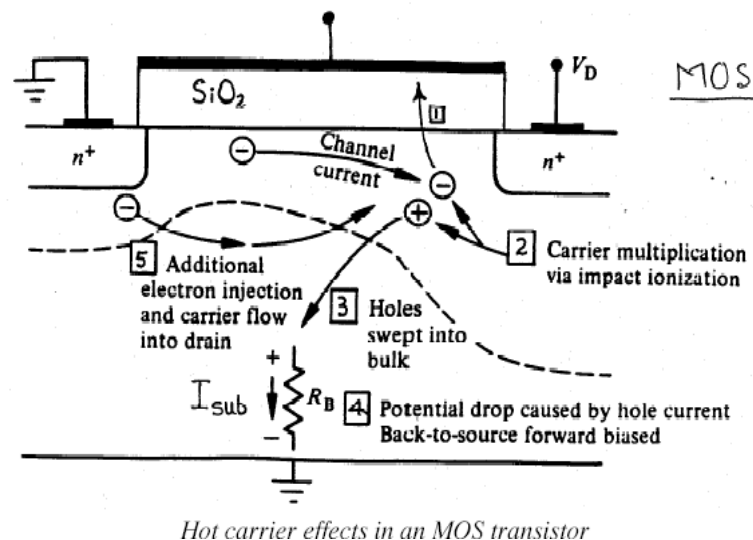
沟道热电子(Channel Hot Electron)

衬底热电子(SHE)

漏极雪崩倍增热载流子(DAHC)

二次产生热电子 (SGHE)

这些热载流子进入SiO₂后
形成栅电流和衬底电流。



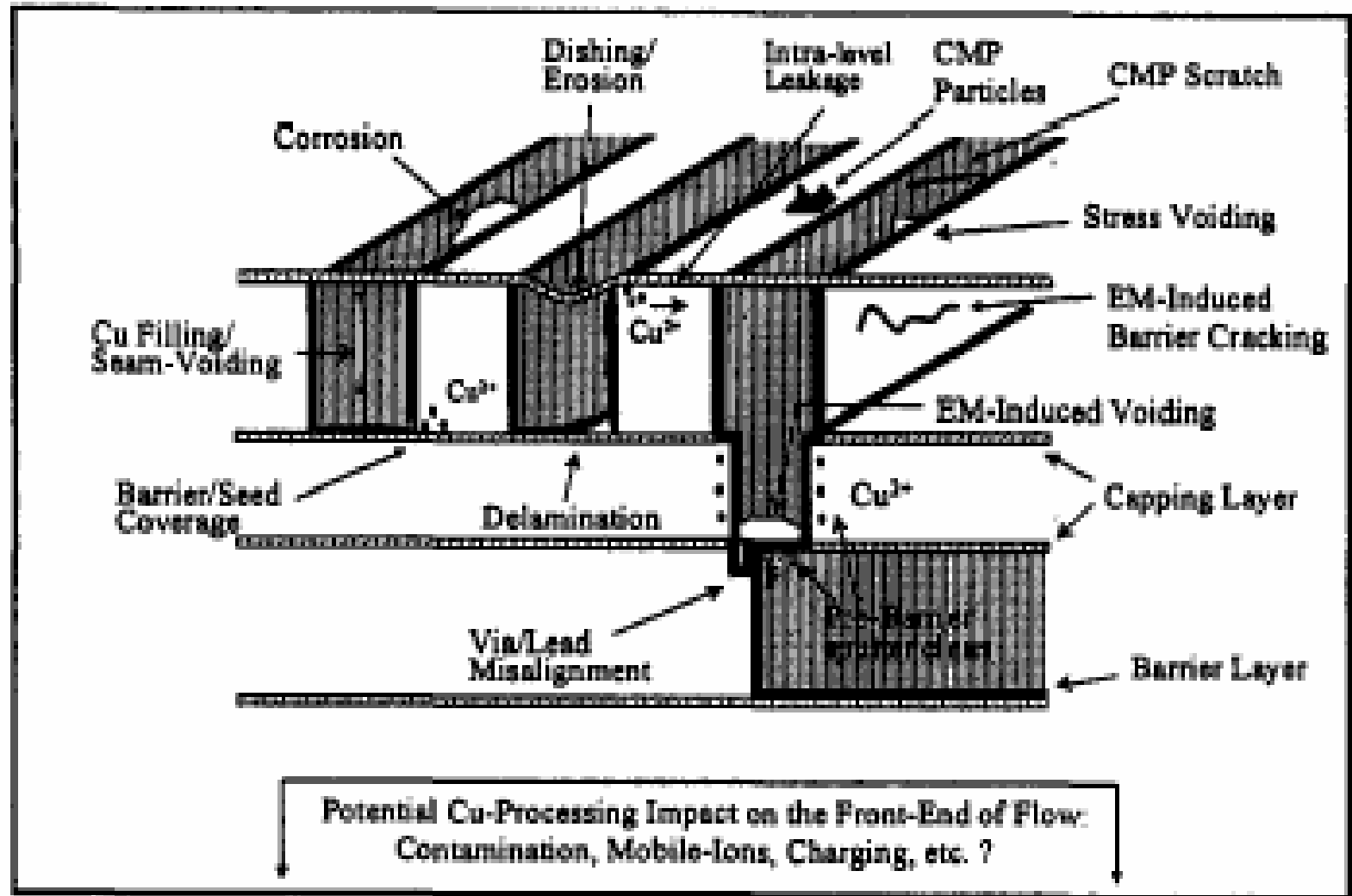
2.3 薄膜的相互扩散

器件的可靠性与金属化自身的稳定性及与相接触材料的相容性紧密相关。

影响金属化自身的稳定性及与相接触材料的相容性的主要机理是金属与金属、金属与半导体材料之间扩散与化合。

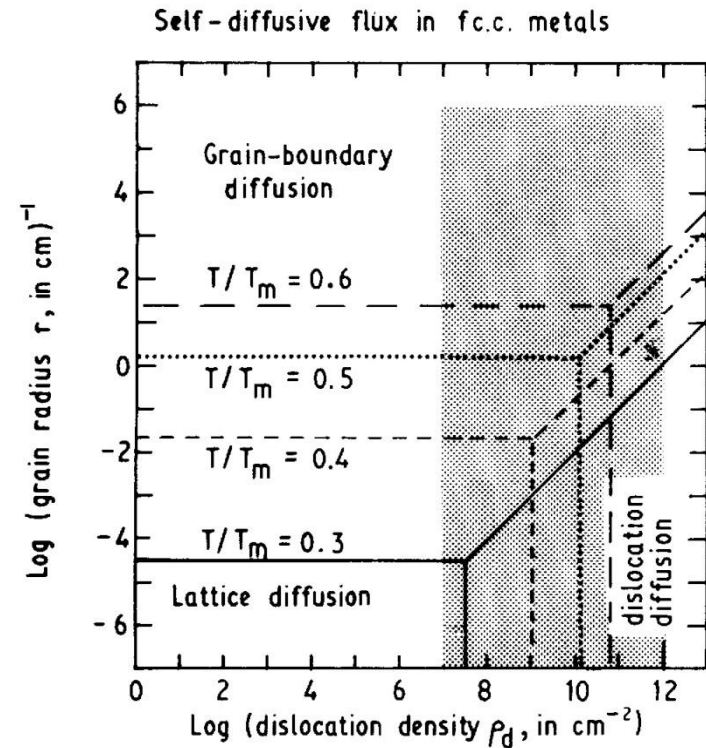
如：Si向Al的溶解、 Au—Al间化合物等。

薄膜扩散与反应造成的可靠性问题



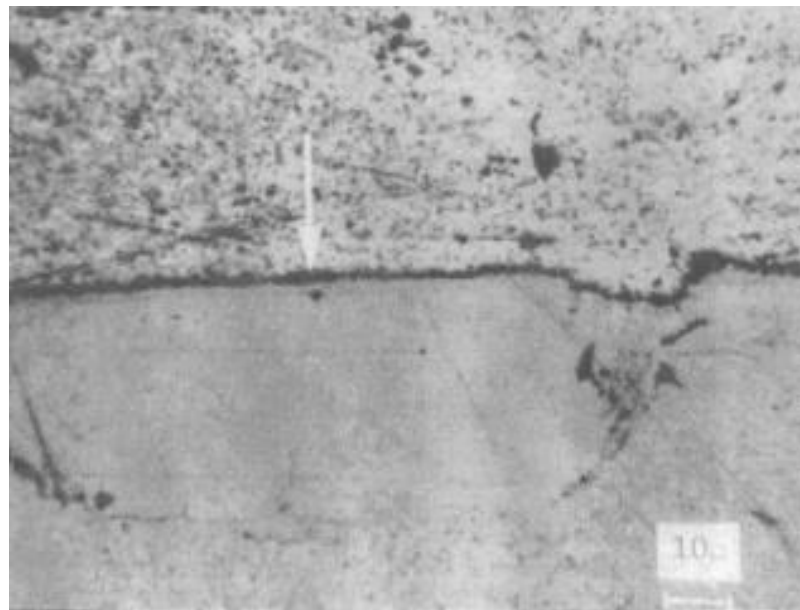
多晶中的扩散

- 多晶薄膜中存在大量的晶粒边界。在一定温度下, 那种成为主要的扩散机理取决于: 温度、晶粒大小 L , 位错密度 ρ_d 。
- 温度越高晶粒扩散的份额越多,
- 晶粒越小, 晶粒边界扩散越显得重要。



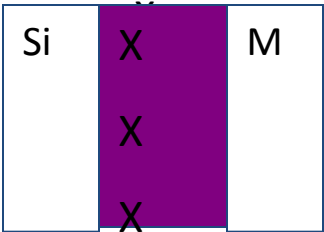
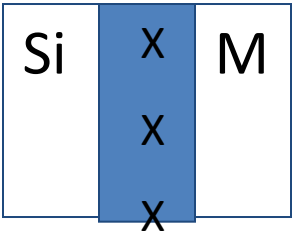
金铝键合失效

2. 当铝丝压焊在镀金层上，铝丝与金层的界面由于出现 Kirkendall 空洞，使得键合强度降低，

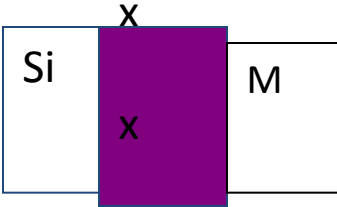


硅化物形成时的标志物试验

| 元素 | 硅化物 | 主要扩散物质 |
|----|--------------------|--------|
| Ni | Ni ₂ Si | Ni |
| Mg | Mg ₂ Si | Mg |
| Co | Co ₂ Si | Co |
| Pd | Pd ₂ Si | Pd, Si |
| Pt | Pt ₂ Si | Pt, Si |
| Fe | FeSi | Si |
| Hf | HfSi | Si |
| Rh | RhSi | Si |
| Ti | TiSi ₂ | Si |
| V | VSi ₂ | Si |



Si扩散



M扩散

硅粒子

为了避免铝钉的出现，采用含1%Si的Al合金来淀积铝膜。

合金时因 Al膜中硅处于过饱和状态，在冷却时，Si从Al中析出并形成硅粒子。

硅粒子减少了铝的有效截面积，增加了薄膜中的应力，使铝膜的电迁移和应力迁移更易于发生。同时使接触电阻增加。

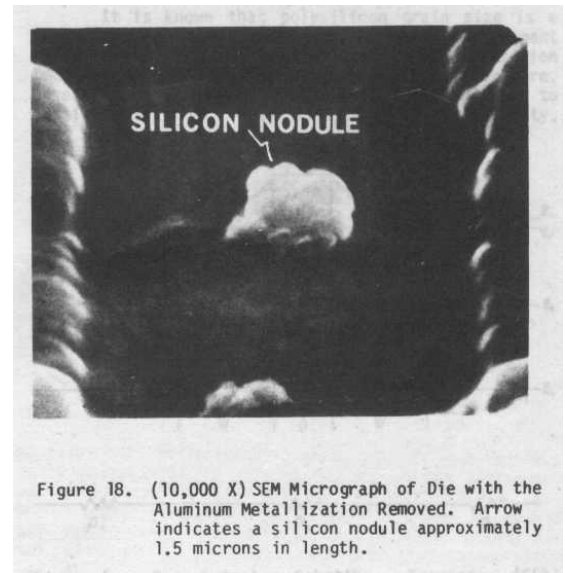
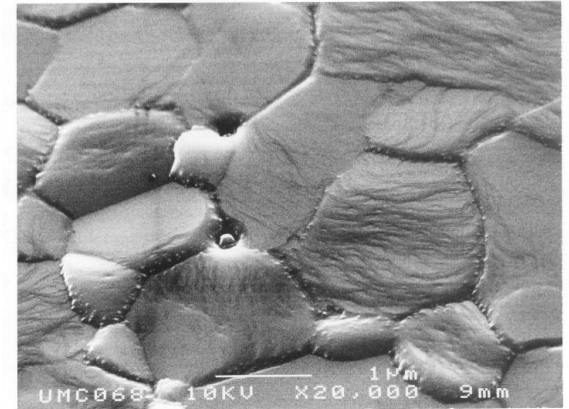
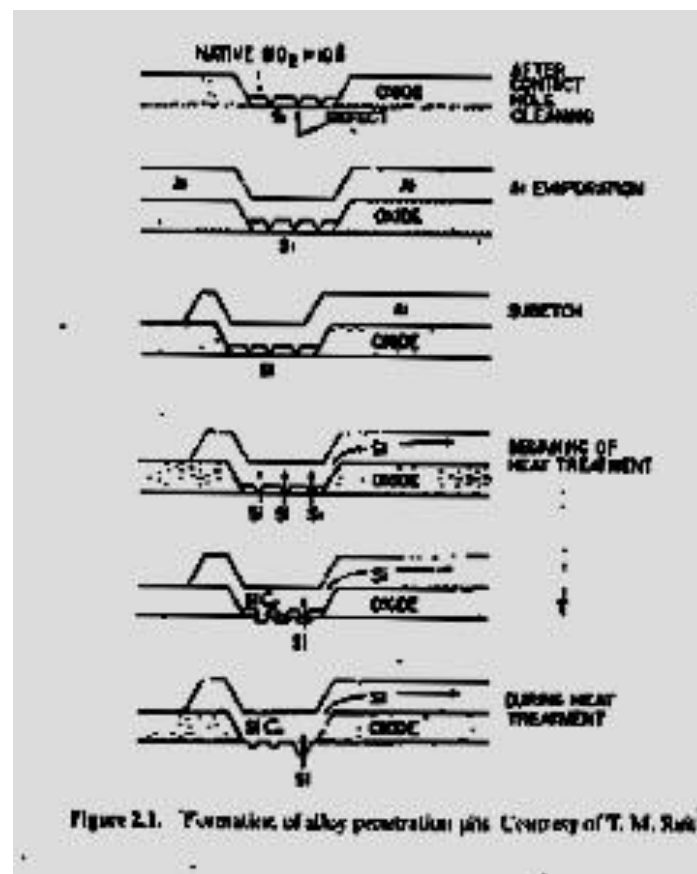
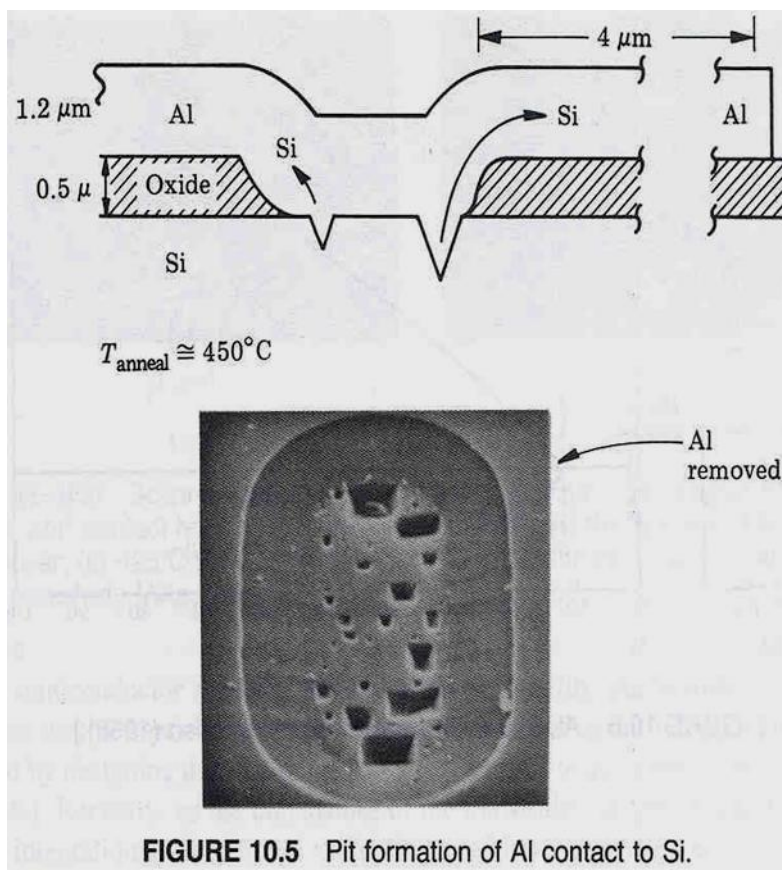


Figure 18. (10,000 X) SEM Micrograph of Die with the Aluminum Metallization Removed. Arrow indicates a silicon nodule approximately 1.5 microns in length.

硅、铝间的扩散

合金时在铝硅接触界面铝向硅中长出的不规则的尖刺。产生原因: 在硅表面有约 **20Å**的天然氧化层, **Al**在表面不均匀地穿透二氧化硅. 铝钉使接触处的P-N结的漏电流增加, 甚至造成短路. 纯铝仅能用于大于2-3 μm 结深的器件。



2.4 静电放电与辐射

静电放电中器件的失效模式

- 1、器件在静电放电失效后表现的失效模式：
完全失效，如：开路、短路、漏电流增大，功能丧失等。
- 2、立即失效和潜在失效：
经受静电放电后，器件可能立即失效也可能仅有参数微小的变化，而在使用中失效率增加。

不同湿度环境中的人体静电电位

| 人 体 状 态 | 静 电 电 位(KV) | |
|-------------------|---------------|---------|
| | 20%RH | 80 % RH |
| 在vinyl 地板上行走 | 12 | 0.25 |
| 在Synthetic地毯上 行 走 | 35 | 1.5 |
| 从泡沫坐垫上起来 | 18 | 1.5 |
| 拾起聚乙烯袋 | 20 | 0.6 |
| 在地毯上推苯乙烯合子 | 18 | 1.5 |
| 从PC板上除去mylar带 | 12 | 1.5 |
| 在PC板上收膜 | 16 | 3 |
| 启动真空去焊料器 | 8 | 1 |

静电放电中器件失效的机理

1. 电压型失效 高电压造成绝缘薄膜击穿，如二氧化硅的击穿；
2. 高温引起的失效 在高压，大电流情况下，造成局部的温度很高，可导致硅熔化，金属化层熔化。
3. 二次效应引起的失效 因高压引起的二次效应，如二次击穿，闩锁效应，热电迁移等，发生二次效应后局部因高压大电流发热，产生高温，使器件损坏而失效。

失效样品照片

Zener二极管Spiking

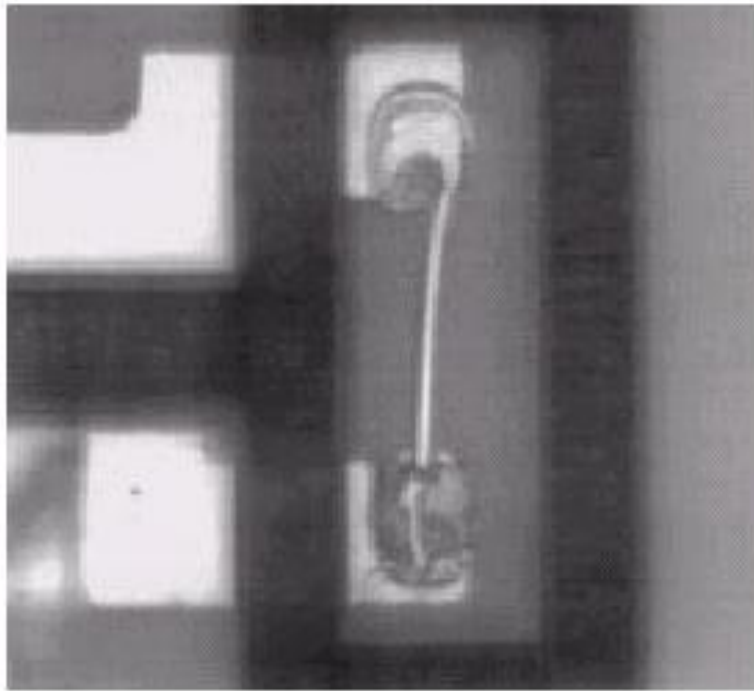


Fig. 6. Zener diode with junction spiking.

Poly 电阻烧毁

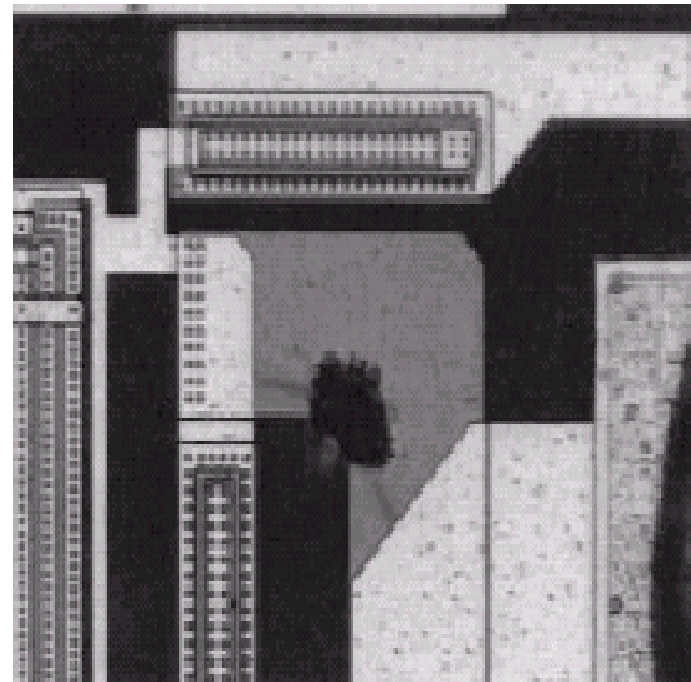


Fig. 5. Blown polysilicon resistor.

失效样品照片

晶体管源漏短路

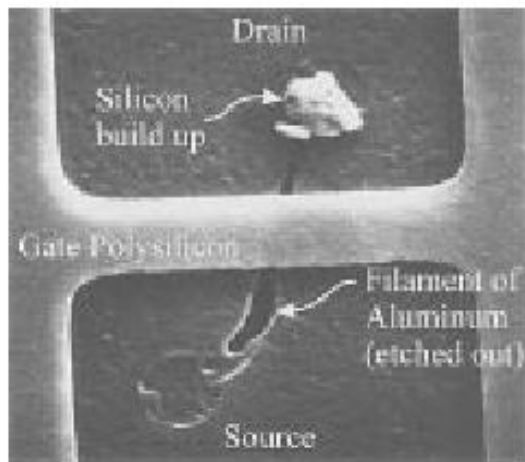


Fig. 16. Resulting short site when the transistor was subjected to EOS.

电容氧化层爆裂

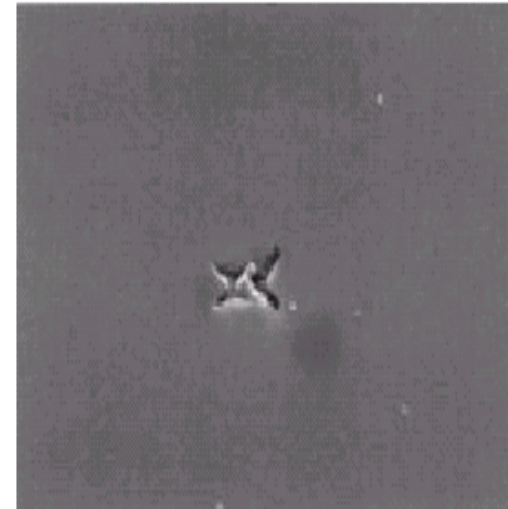


Fig. 7. Oxide rupture in capacitor oxide from ESD.

ESD引起的失效

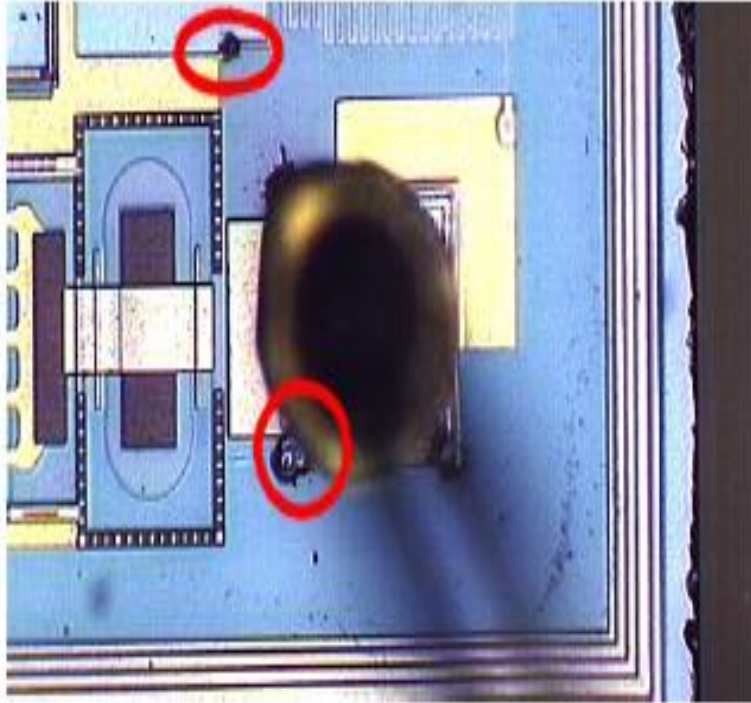
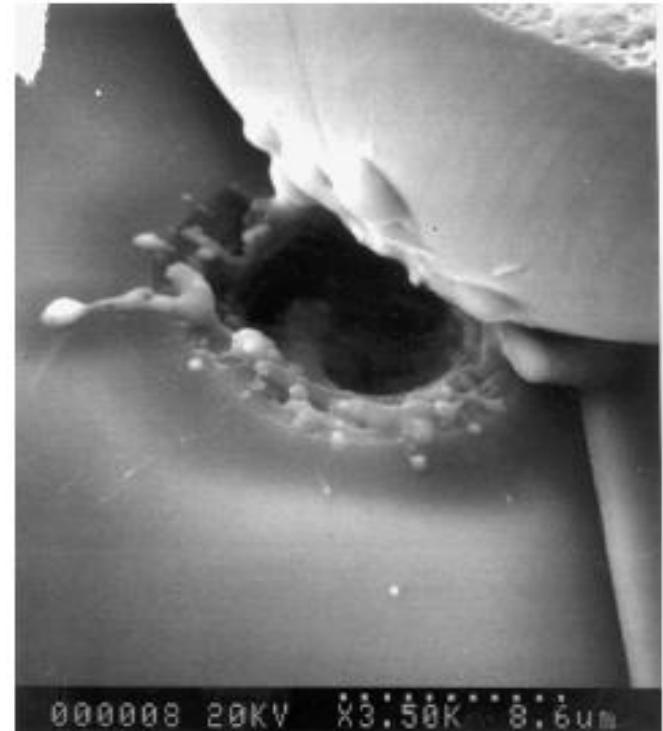


Figure 27. Visual ESD Defects



辐射环境

1.空间辐射环境

- 空间辐射环境包括宇宙射线、太阳风、范艾伦带辐射、极光辐射和太阳耀斑等。
- 宇宙射线约占地球表面电离辐射的四分之一。宇宙射线的初级辐射中，质子占**90%**， α 粒子占**10%**，其它重离子为**1%**。这些宇宙粒子的能量很高，每个粒子的能量范围从几兆电子伏直到超过 **$1 \times 10^{14} \text{MeV}$** ，峰值在**300MeV**。
- 被地球磁场俘获的宇宙射线中的带电粒子，在地球的周围形成内、外两个环形辐射带，称为内、外范艾伦(**Van Allen**)带，它处于地磁赤道的上空。

辐射环境

2、地面天然辐射环境

- 在地球表面的地壳岩石中，存在着微量的天然蜕化放射性元素，主要的元素有铀U，钍Th等。在一些氧化铝和玻璃中U的含量可以达到10ppm，Th的含量可达到6ppm，每小时从1平方厘米面积发射的 α 粒子可高达45个。
- 在封装用的玻璃中，典型的氧化物有铅、铝、锌等元素，它们会具有高的放射性。在塑料封装通常用石英为填料，在石英这常含U和Th达到1—2ppm，

材料中的放射性元素含量

| 材料种类 | U (ppm) | Th(ppm) | $\alpha/\text{cm}^2\text{-hr}$ | Zr% |
|---------|---------|---------|--------------------------------|------|
| 氧化铝 - A | 2.5 | 0.6 | 0.6 | 1 |
| 氧化铝 - B | — | — | 0.3 | — |
| 氧化铝 - C | — | 6 | 0.5 | 17.5 |
| 玻璃 - A | 12 | 3 | 29 | 3 |
| 玻璃 - B | 2.5 | 6 | 5.2 | 25 |
| 玻璃 - C | 17 | 6 | 45 | 6 |
| 玻璃 - D | 12 | | 18 | 20 |
| 玻璃 - E | — | — | 32 | — |
| 环氧树脂 | — | — | 1.7 | — |
| 硅酮树脂 | — | — | 1.3 | — |
| 镀金引线 | — | — | 0.04— 1.0 | — |

材料的辐射效应

辐射与物质的相互作用的基本形式是电离和位移，其总能量的损失是这两部分的和。

1. 位移效应

在这两个过程中只有位移过程在辐射粒子径迹周围产生晶格畸变，造成位移损伤。

辐照后硅材料中的位移缺陷约有**60**种，其中**20**余种已确定了微观结构。

材料的辐射效应

2. 电离效应

高能粒子，入射到物质中，能使一部分的电子激发。对于这种激发可以使半导体和绝缘体中的电子从价带跃迁到导带，产生电子—空穴对，因而对半导体和绝缘体的电导率影响较大。因为金属本来在导带中的电子和空的能态就很多，所以这种激发的影响不大。

双极型三极管的辐照效应

- 辐照的对双极型三极管结构参数的主要影响有：
 - 1. 器件表面氧化层正电荷积累；
 - 2. 界面态密度增加；
 - 3. 基区少数载流子寿命降低；
 - 4. 半导体材料电阻率增加。

MOS场效应晶体管的辐射效应

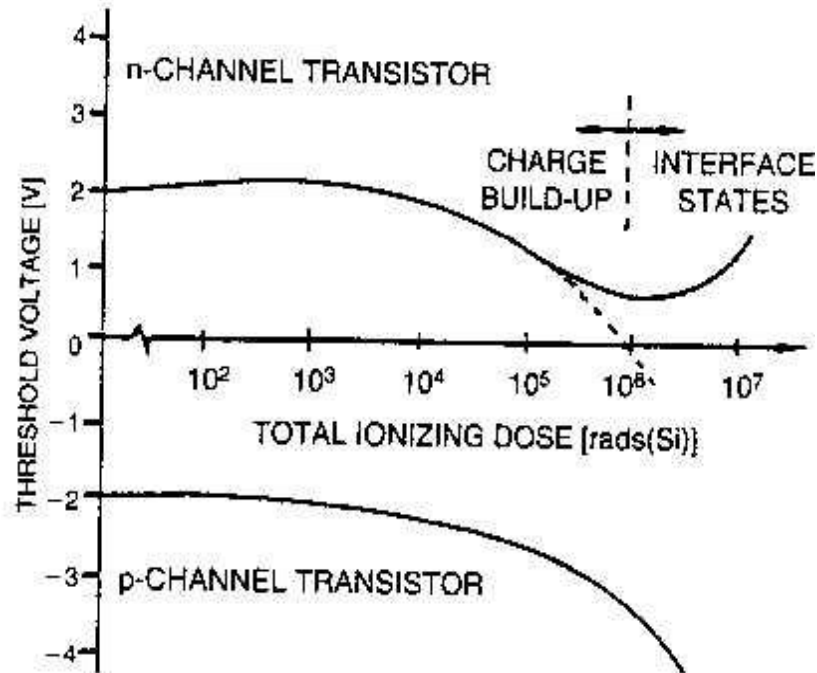


Figure 7-4. Curves showing effect of ionizing radiation (gamma) on the n- and p-channel transistors [4].

集成电路的辐照效应

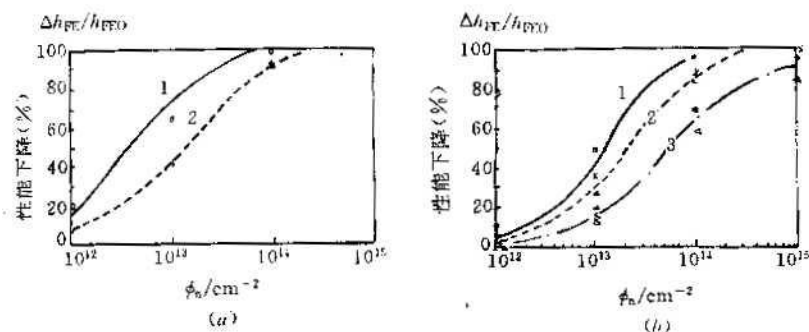


图 5.16 双极型线性电路晶体管电流增益随中子辐射下降
(a)为:1—横向 pnp 晶体管,2—垂直 pnp 晶体管;(b)为:
1—高电流增益、高击穿电压晶体管,2—中等击穿电压晶
体管,3—中等电流增益、低击穿电压晶体管。

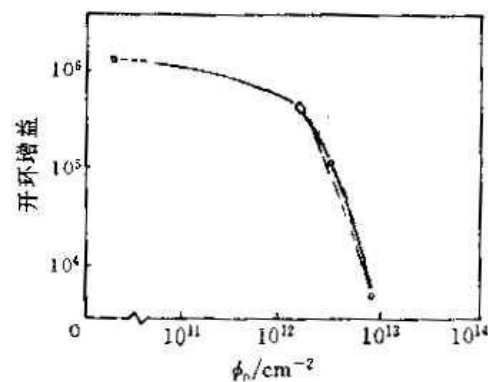


图 5.15 108 运算放大器的开环增益随中子辐射通量的衰减

辐照时体CMOS电路的闩锁效应

- CMOS电路中有大面积的阱与衬底间形成的P—N结，它的面积约占芯片面积的30—40%，而且这个P—N结是常处于反向偏置。它在瞬时辐照下会产生很大的光电流。在CMOS电路瞬时电离辐射闩锁效应模型中主要考虑的就是这个光电流。其它MOS晶体管源漏P—N结的光电流要小得多，

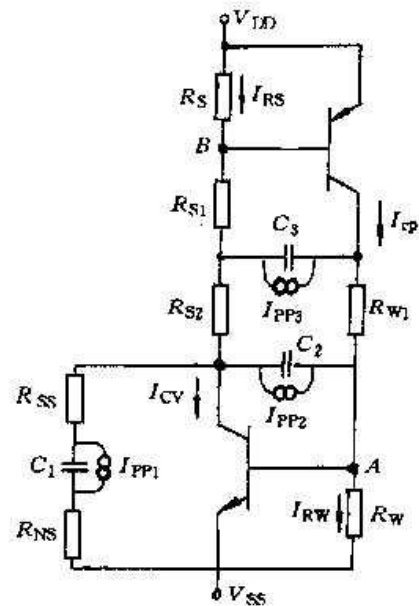
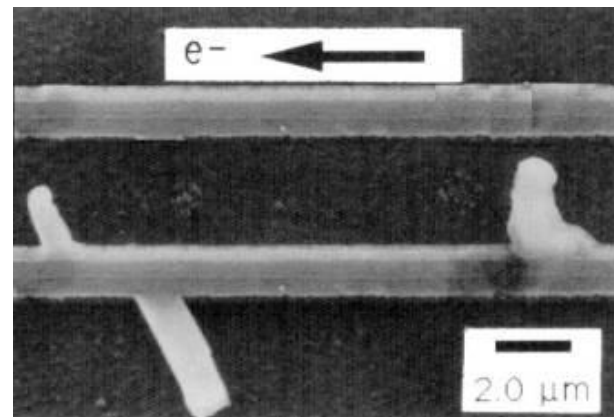
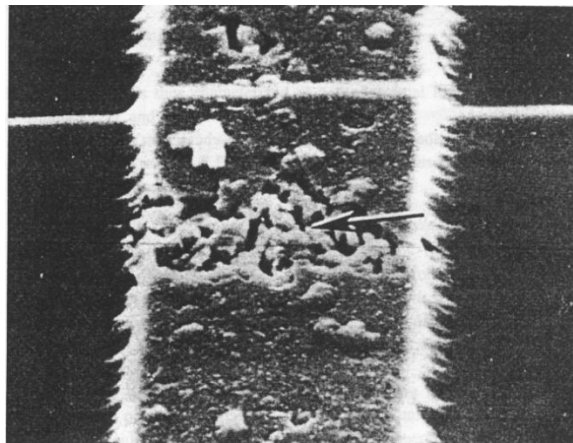
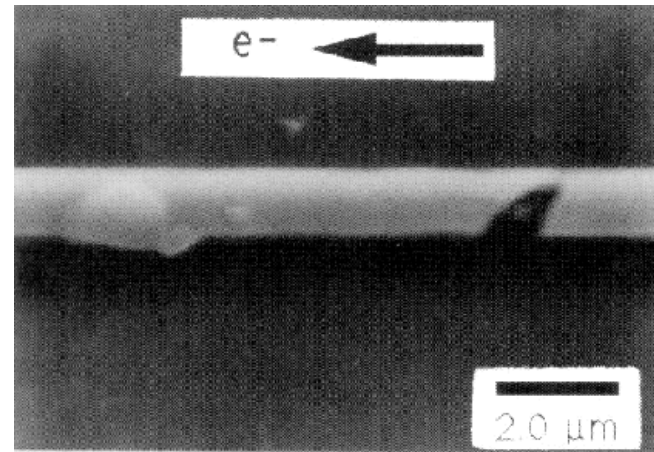
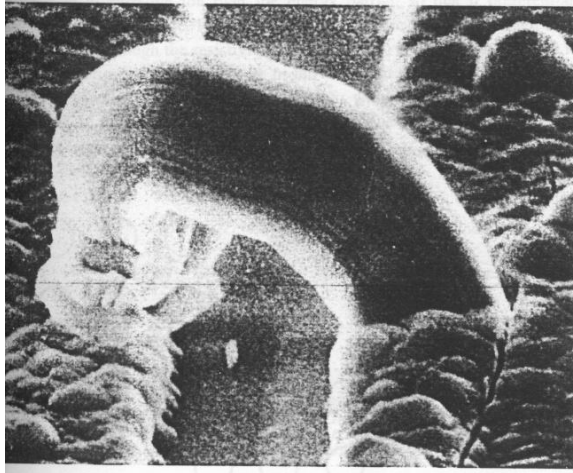


图 5.24 包含瞬时光电流分量的闭锁电路模型

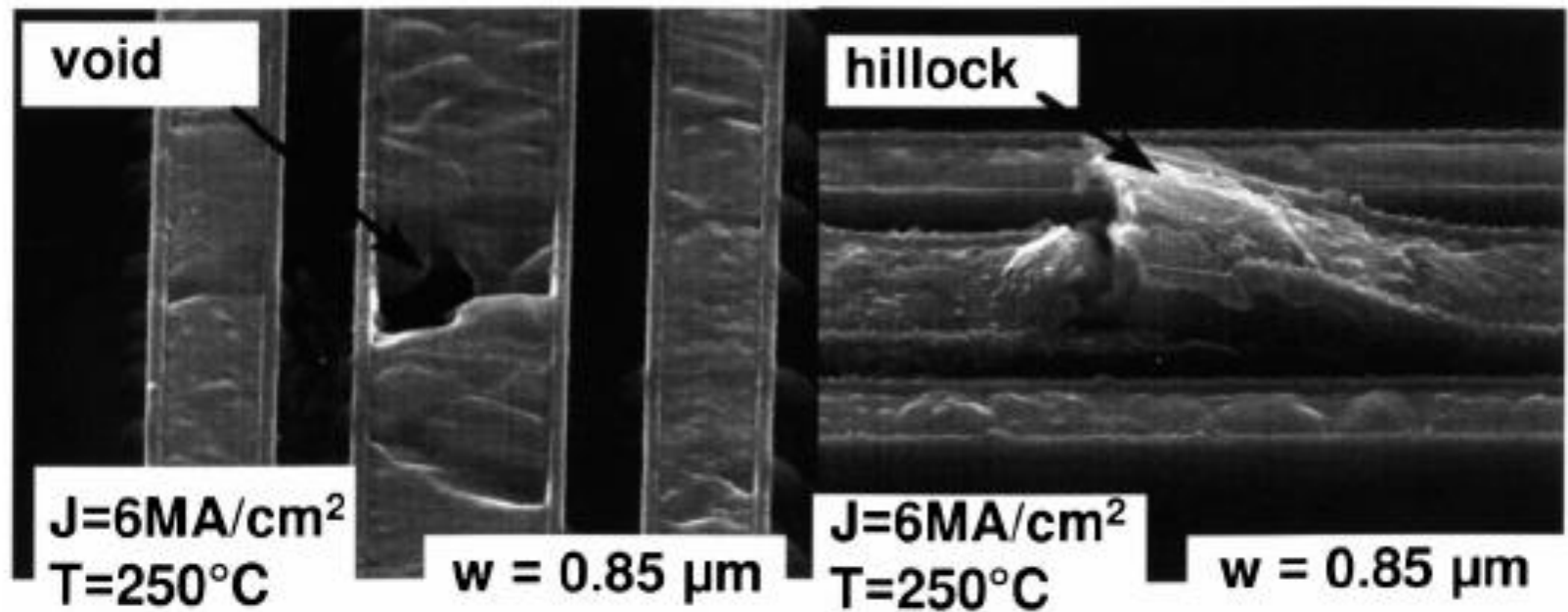
2.5 金属互联的电迁移

- 导体原子和流经导体的直流电流相互作用而造成的自体传输、纯质材料中的原子运动和合金中溶剂原子的运动。
- 驱动力：
 - 电场和失去价电子的原子离子之间的静电相互作用
 - 离子和流动的电荷载体之间的摩擦力——“电子风”
- 发生条件：
 - 直流
 - 大电流密度

Al 导线中的电迁移



Cu导线中的电迁移

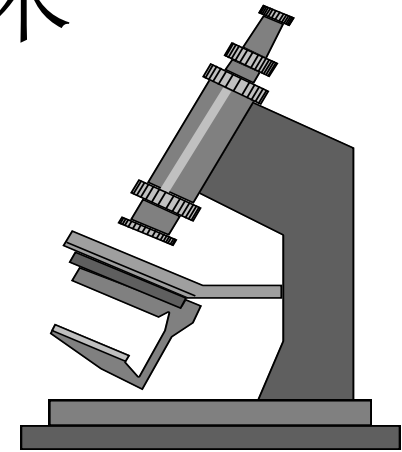


电迁移的影响因素

- 流束离散
- 电迁移寿命
- 电迁移与结构的突变
- 电迁移与晶粒（尺寸、取向和三角晶界）
- 温度梯度对电迁移的影响
- 电迁移与应力
- 电迁移与导线尺寸
- 电迁移与导线材料组分
- 表面钝化和阻挡层保护

3、芯片失效分析技术

分析仪器 Equipment



质谱仪

- | | |
|------------|------------|
| • 二次离子质谱 | SIMS |
| • 飞行时间离子质谱 | TOF - SIMS |
| • 等离子耦合质谱 | ICP - MS |

能谱仪

- | | |
|-----------|-----|
| • 俄歇电子能谱 | AES |
| • X光电子能谱 | XPS |
| • X线能量色散谱 | EDX |
| • 卢瑟福背散射谱 | RBS |

色谱仪

- | | |
|----------|------|
| • 离子色谱仪 | IC |
| • 高效液相色谱 | HPLC |

光谱仪

- | | |
|-----------|-------------|
| • 原子吸收光谱 | AAS |
| • 付理叶红外光谱 | FTIR |
| • X线荧光光谱 | XRF |
| • 发光显微镜 | EMMI+OBIRCH |

显微镜

- | | |
|-----------|-----|
| • 透射电子显微镜 | TEM |
| • 扫描电显微镜 | SEM |
| • 光学显微镜 | OM |
| • 原子力显微镜 | AFM |
| • 聚焦离子束 | FIB |