

微电子器件可靠性

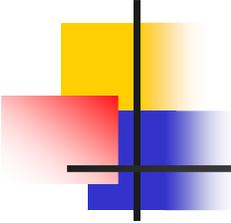
Reliability of Microelectronic Devices

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

第二次课 失效物理



第二次课 失效物理

本次课内容

- 3.1 氧化层中的电荷
- 3.2 热载流子效应
- 3.3 栅氧击穿
- 3.4 电迁移
- 3.5 与铝有关的界面效应
- 3.6 热电效应

补充材料:

实例: Rcl 失效光点

氧化层漏电分析报告

热击穿 电击穿 PN结击穿特性 雪崩击穿 齐纳击穿 二次击穿等(图)

本次课要点

- 1、氧化层中有几种电荷? 它们的分布和特性如何? 对可靠性有何影响? 如何降低它们的影响?
- 2、什么热载流子效应? 什么是电荷泵技术? 热载流子的影响与改进?
- 3、栅氧击穿有几种情况? 它们的机理是什么? 有何改进措施?
- 4、什么是电迁移? 影响电迁移的因素有哪些? 抗电迁移措施? 铝膜再构与应力迁移与电迁移有何异同?
- 5、铝与硅, 与二氧化硅有哪些反应? 防止措施有哪些? 金与铝有何反应? 金铝键合有何缺点?
- 6、什么是热阻? 什么是二次击穿, 如何改进?

3.1 氧化层中的电荷: Q_f Q_m Q_{it} Q_{ot}

Q_f : 固定电荷

位置: 位于Si-SiO₂界面 $<2.5\text{nm}$

电性: 正电荷

原因: 主要是氧空位

特点:

- 无电容效应。
- 与掺杂无关, 与氧化层厚度无关
- 与晶向有关: $111 > 110 > 100$
- 与工艺过程中最后一次高温过程有关

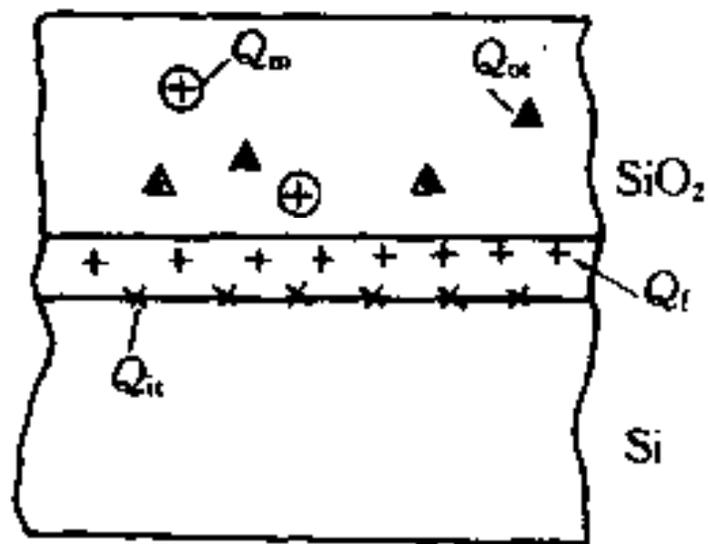


图 3.1 SiO₂ 中的电荷

氧化层中的电荷: Q_f Q_m Q_{it} Q_{ot}

Q_m : 可动电荷

位置: 两个界面多, 中间少

电性: 多数为正

来源: K^+ , Na^+ Li^+ 粘污

特点:

- 高温下加电可以迁移
- 填隙式, 远大于B、P的扩散系数

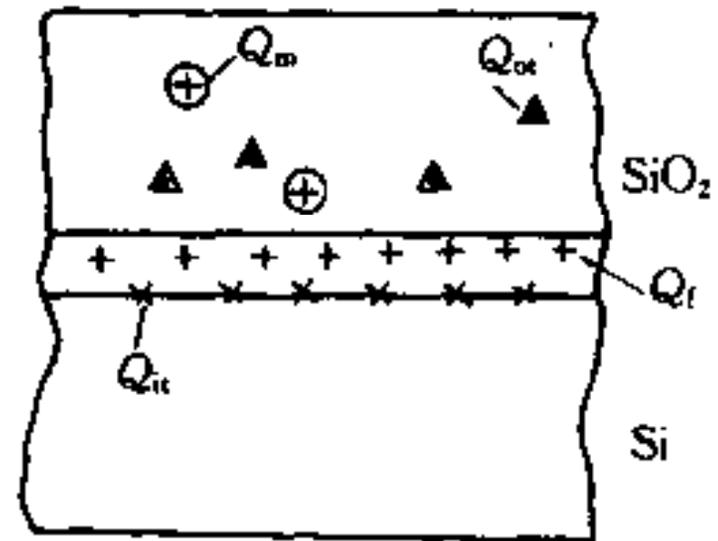


图 3.1 SiO_2 中的电荷

氧化层中的电荷: Q_f Q_m Q_{it} Q_{ot}

Q_{it} : 界面陷阱电荷, 界面态

位置: Si-SiO₂界面

电性: 可正可负

来源: 悬挂键; 金属离子粘污

特点:

- 有电容效应, 对1/f噪声影响大
- 与晶向有关 $111 > 110 > 100$
- 与工艺过程中的热处理有关

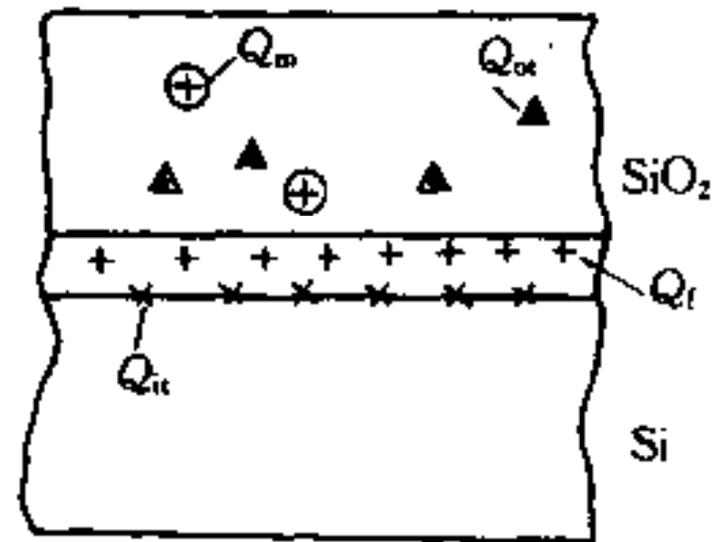


图 3.1 SiO₂ 中的电荷

氧化层中的电荷: Q_f Q_m Q_{it} Q_{ot}

Q_{ot} : 氧化层电荷

位置: 无规律

电性: 可正可负

来源: 辐射、注入刻蚀等过程

特点:

- 有电容效应
- 位置不变
- 退火可以部分消除

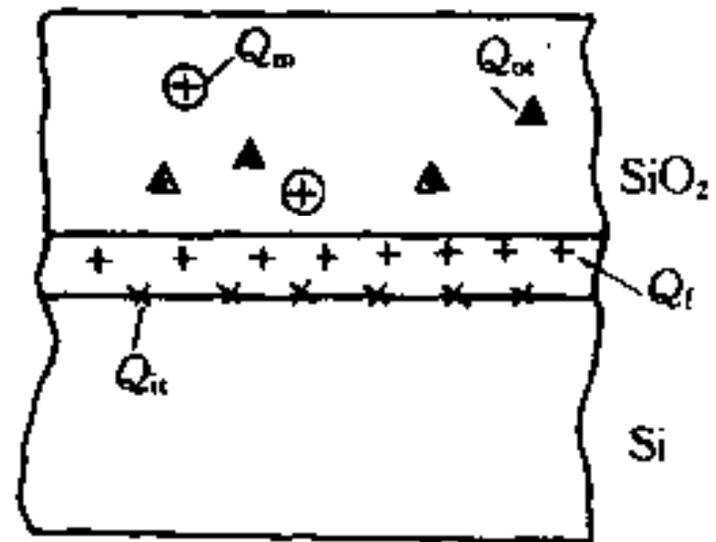
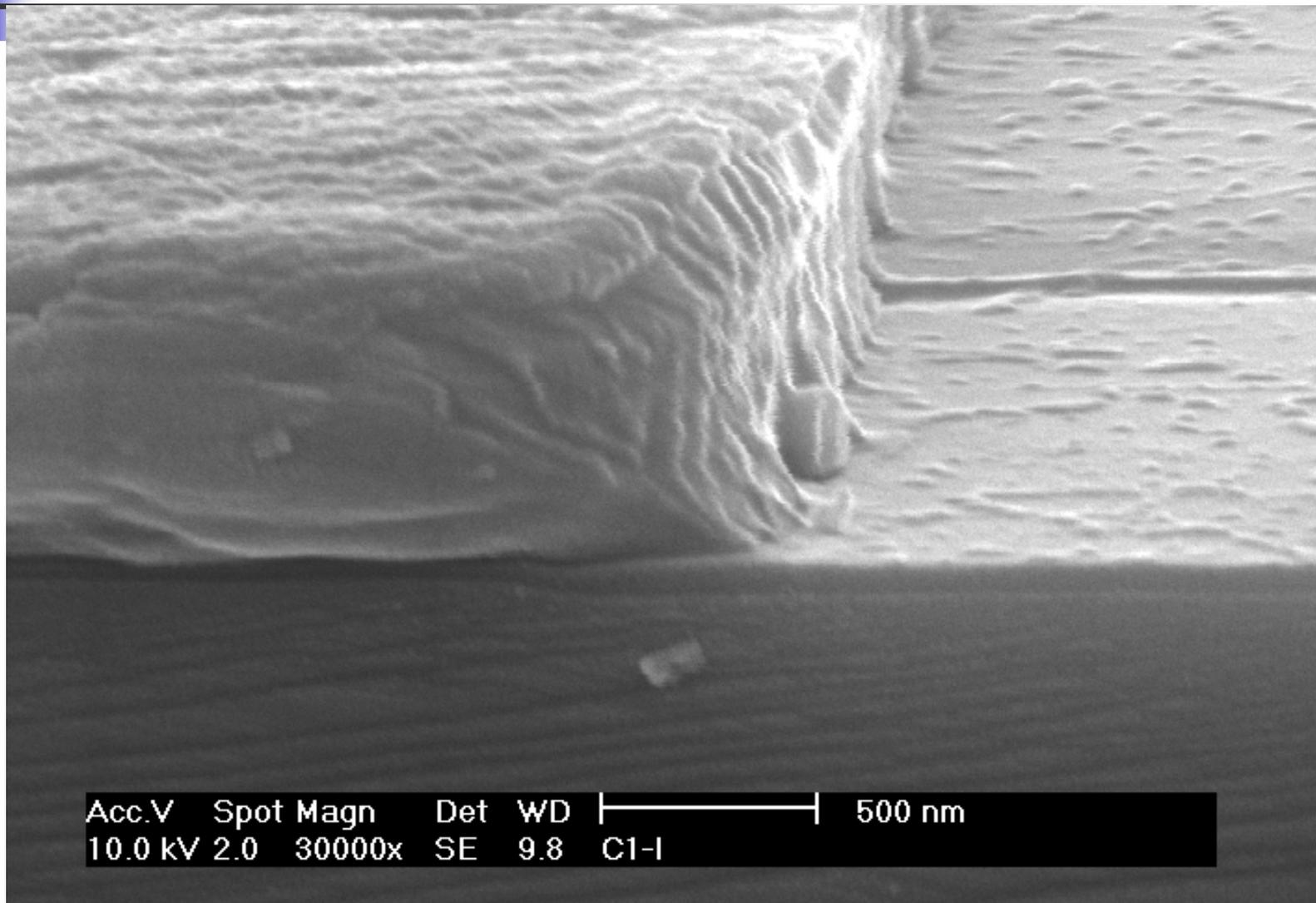


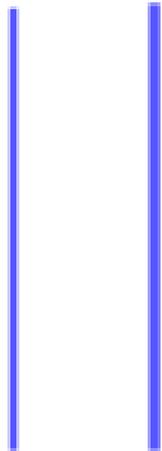
图 3.1 SiO₂ 中的电荷

氧化层有多厚？ 250A



氧化层厚度与灰尘颗粒对比

氧化层厚度
25nm 40nm



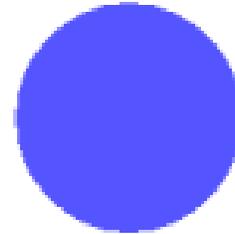
颗粒大小

0.2um

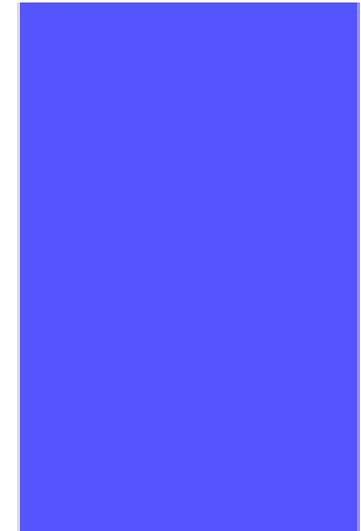
0.3um

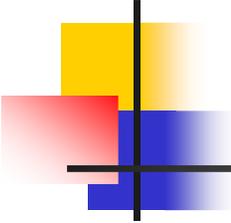
0.5um

1um



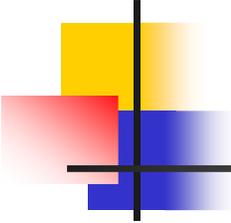
铝线宽度+
1.5um+





对可靠性影响

- 增加PN结漏电
- 空间电荷区展宽，击穿；
- 出现感应结，漏电；
- 引起阈值电压漂移，跨导和截止频率下降；
- 对电流增益及噪声的影响；
- 动态存储器上氧化层电容；
- 产生复合噪声；
- CCD暗电流；

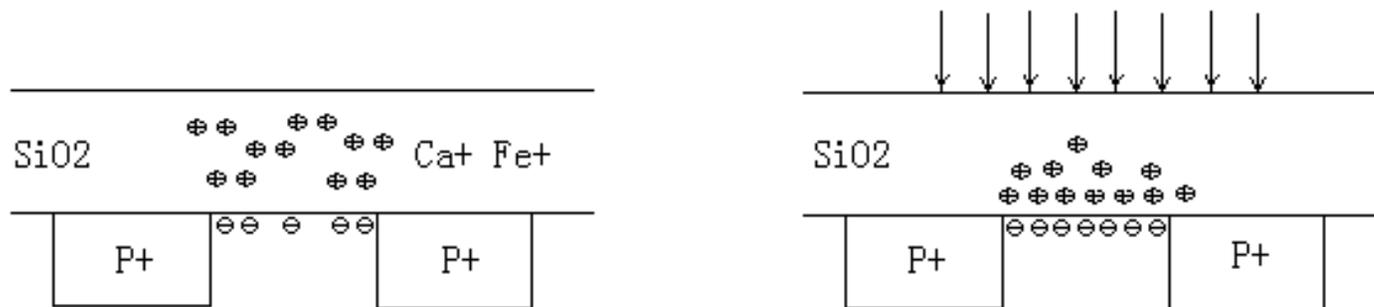


降低氧化层电荷的方法

- 1、 Q_m ，主要防止粘污，清洗，炉管，夹具等, CV监测
- 2、 选用100晶向的，使 Q_f 及 Q_{it} 降低。
- 3、 高温退火，使 Q_f 及 Q_{it} 降低。
- 4、 特殊工艺：比如减少热感生缺陷等。
- 5、 高温存储，高温反偏筛选。

透过栅氧打耗尽（临时办法）

1、工艺调整，透过栅氧打耗尽

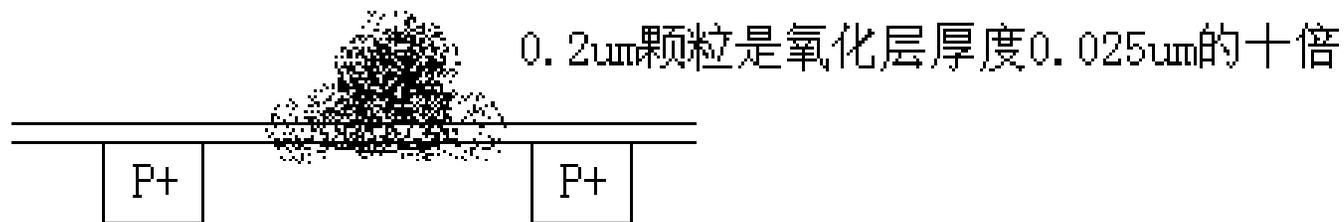


■ 缺点：

- 1) 没有解除粘污，造成“馅饼”效果，对可靠性及耐ESD有负面影响；
- 2) 将金属正离子赶向Si-SiO₂界面，加重了正电荷对V_t的影响，使V_{tp}更高，V_{tn}更低；
- 3) 透过氧化层做注入，高能离子在氧化层中造成损伤，对后续退火工艺造成压力。

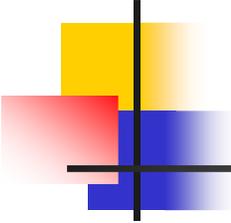
加强清洗（不治本）

涂胶显影过程及清洗后重新粘污的颗粒大小与氧化层



缺点：

- 1) 靠后工序清洗保证只是治标。
- 2) 涂胶显影过程造成的缺陷不一定能清洗掉。“底片粘污，人像麻脸”



3.2 热载流子效应

什么是热载流子？

- 热载流子是能量比费米能级大几个 kT 以上的载流子，当其能量超越界面势垒时，就会进入氧化层，引起器件性能变化。一般主要指热电子。

热载流子对器件影响：

- 对双极器件：电流增益下降，PN结击穿电压蠕变。
- 对MOS器件：注入氧化层中的电荷增加

雪崩热载流子的产生和注入

类似钱塘江潮，越窄的地方流越急

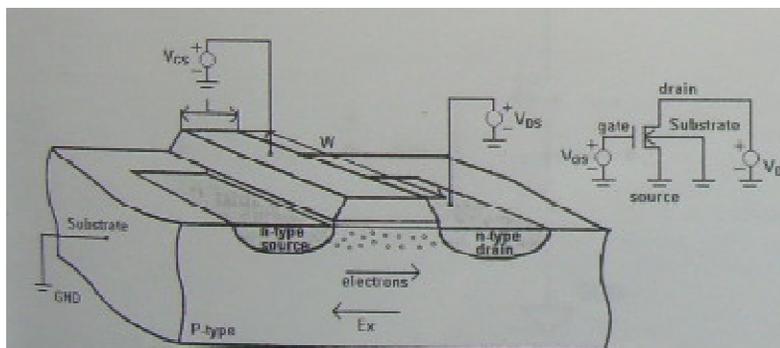


Figure 3.7 Summary of an n-channel MOS transistor operation

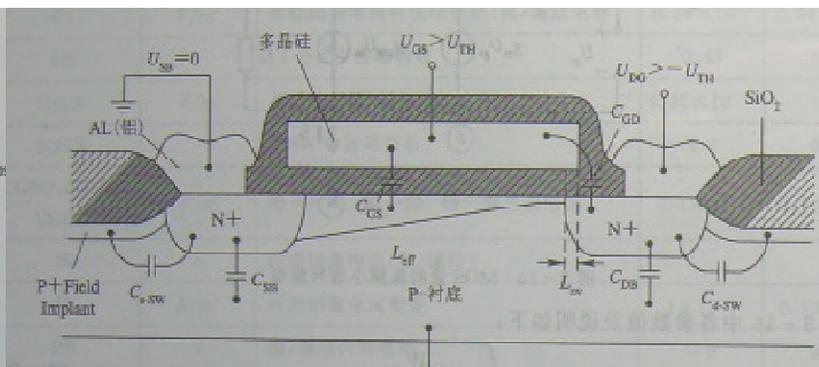


图 3-18 NMOS 管的电容

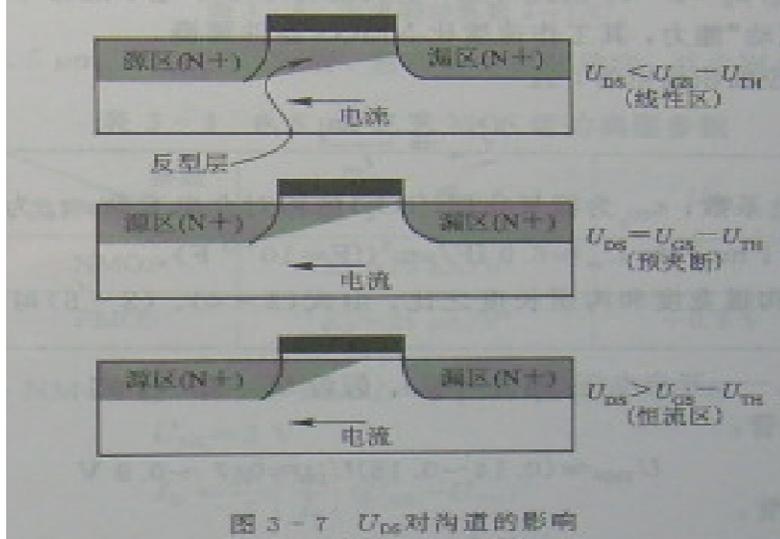


图 3-7 U_{DS} 对沟道的影响

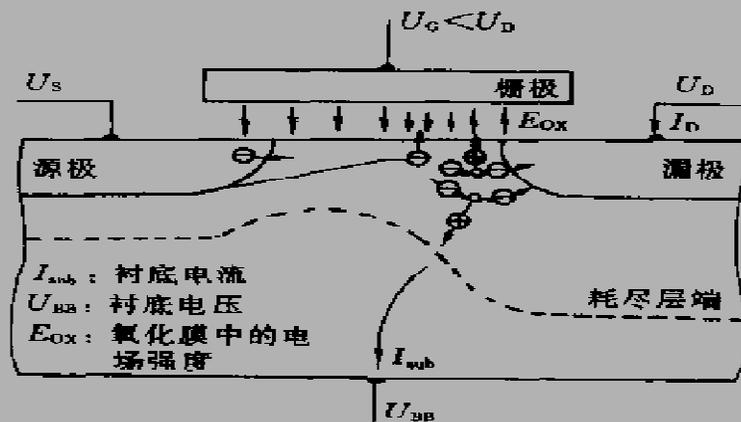


图 3.5 雪崩热载流子条件下热载流子的产生与注入

研究热载流子方法——电荷泵技术

- 器件的源和漏极连在一起后与衬底间施加一反向偏压，栅极连到一脉冲发生器。波形及幅度由示波器监视。脉冲常用矩形。
- 当脉冲电压使n沟MOS器件从堆积进入反型时，从源—漏区进入沟道的电子，一部分被界面态所俘获，当栅脉冲使沟道回到堆积时，沟道区中的未被俘获的电子在反向偏压作用下又回到源(漏)极，但被界面态俘获的电子与自衬底的多子(空穴)复合，这样通过界面态产生一个从衬底到漏源至源漏的电荷流动，此即所谓的电荷泵电流 I_{cp} ，它由串在衬底回路中的电流计测出。

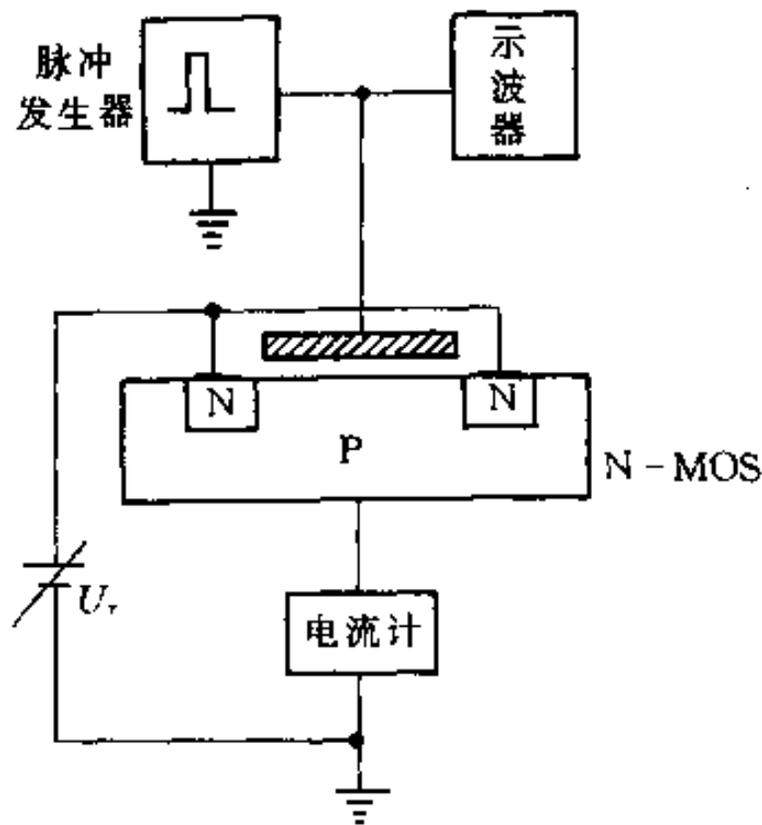


图 3.6 电荷泵测试原理图

研究热载流子的方法——电荷泵技术

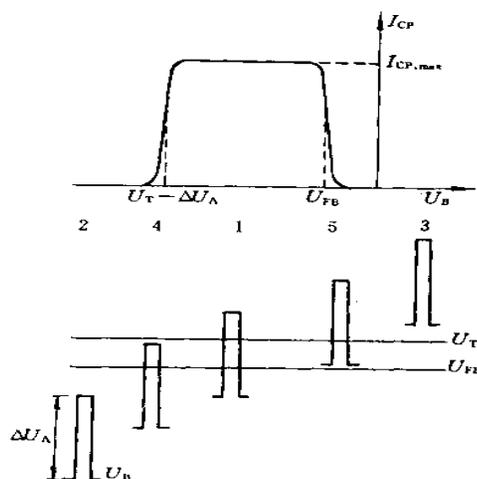


图 3.7 N 沟 MOSFET 在 ΔU_A 固定, 其 $I_{CP} \sim U_B$ 变化关系情况的说明

I_{CP} 随 U_B 的变化情况如图 3.7 所示。在区域 1, 偏置电压 U_B 低于平带电压 U_{FB} , 而脉冲顶高于阈值电压 U_T , 发生 CP 效应即产生电荷泵电流。在区域 2, 栅脉冲的顶部及底部都低于 U_{FB} , 界面态一直由空穴所填充, 没有复合电流产生。在区域 3, 沟道一直处于反型, 没有空穴能到达表面, 也不产生 I_{CP} , 只存在漏电电流。当从区域 1 向区域 2 过渡, 脉冲顶部达不到 U_T 时(区域 4), 沟道电子急剧减少, I_{CP} 在 $U_T - \Delta U_A$ 处急速下降。在区域 5, 脉冲底部比 U_{FB} 高, 没有空穴流入, 在 U_{FB} 处 I_{CP} 也急速下降。 I_{CP} 的幅值是界面态的一种度量, 由

影响因素及改进措施

影响因素：

温度，低稳时电子自由程大，易失控达高速

水分杂质：采用氮化硅保护

交流情况下比直流严重

改进措施

降低电场强度

改进栅氧质量

适当增加宽长比

筛选试验（低温下增强）

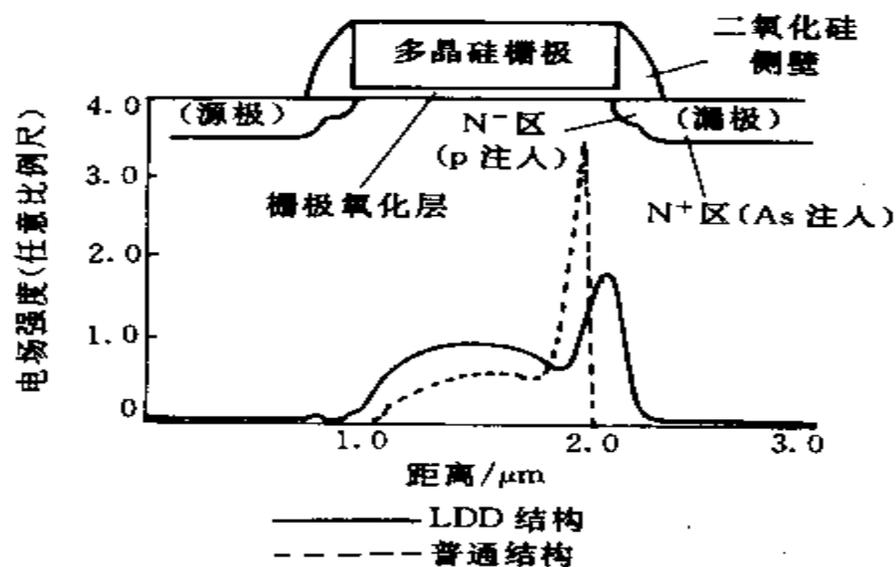
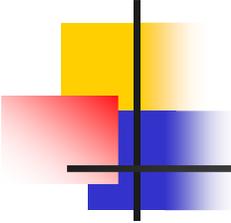


图 3.9 LDD 结构和普通结构电场强度的比较

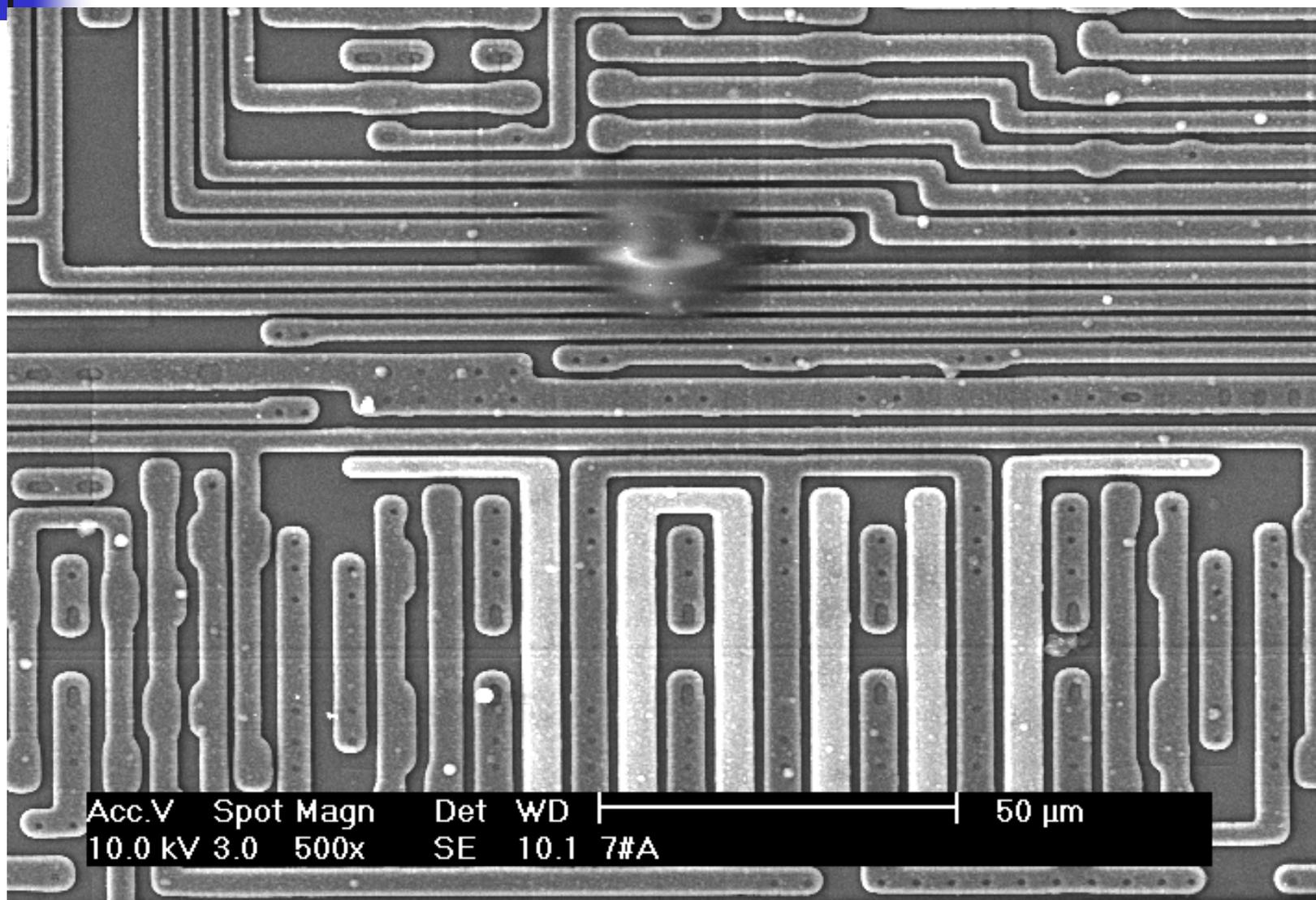


3.3 栅氧击穿

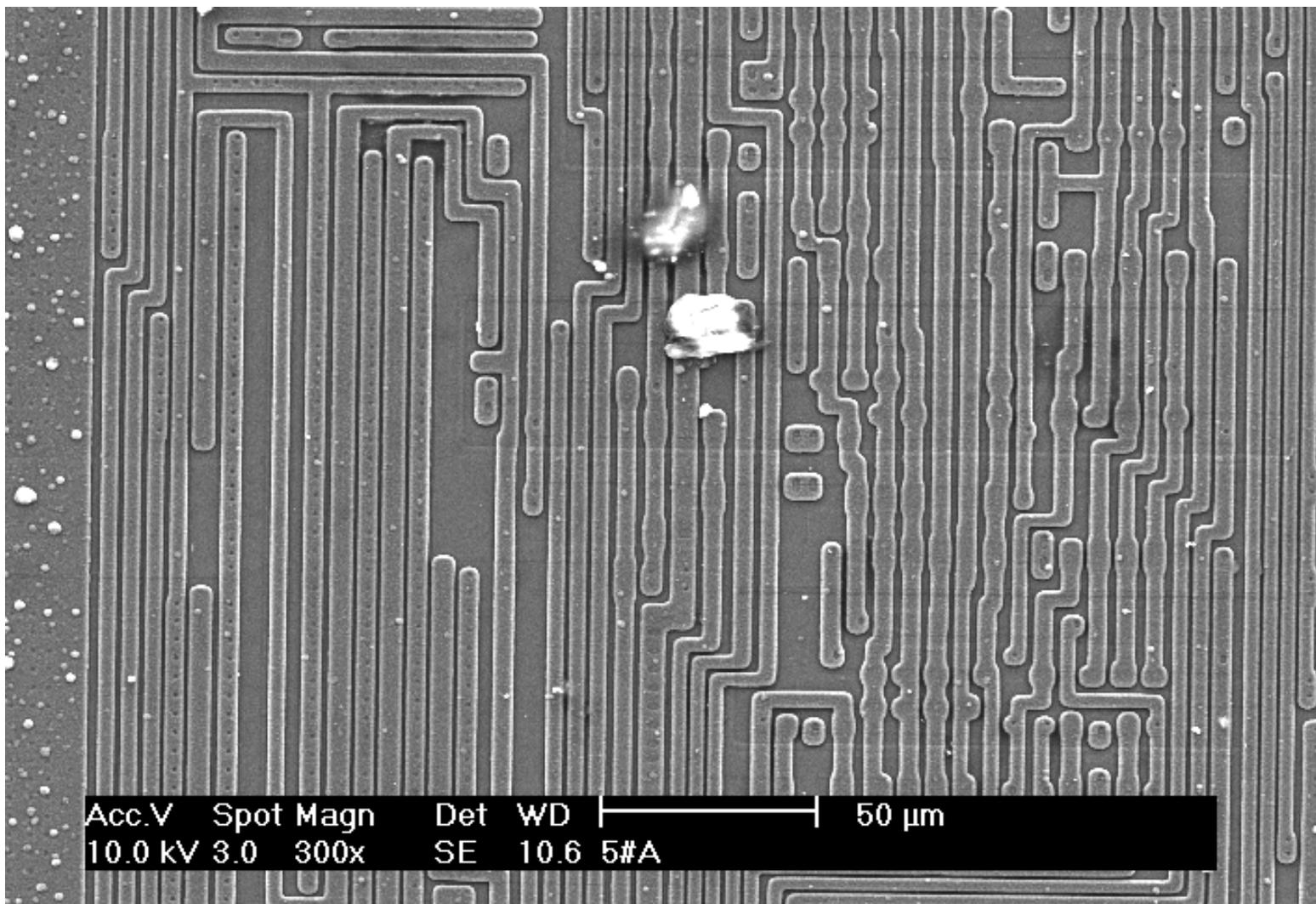
击穿情况

- (1) 瞬时击穿 电压一加上去，电场强度达到或超过该介质材料所能承受的临界场强，介质中流过的电流很大而马上击穿，这叫本征击穿。实际栅氧化层中，某些局部位置厚度较薄，电场增强；也可存在空洞(针孔或盲孔)、裂缝、杂质、纤维丝等疵点，它引起气体放电，电热分解等情况而产生介质漏电甚至击穿，由这些缺陷引起的介质击穿叫非本征击穿。
- (2) **TDDB** (经时击穿time dependent dielectric breakdown) 与时间有关的介质击穿是指施加的电场低于栅氧的本征击穿场强，并未引起本征击穿，但经历一定时间后仍发生了击穿。这是由于施加电应力过程中，氧化层内产生并积聚了缺陷(陷阱)的缘故。

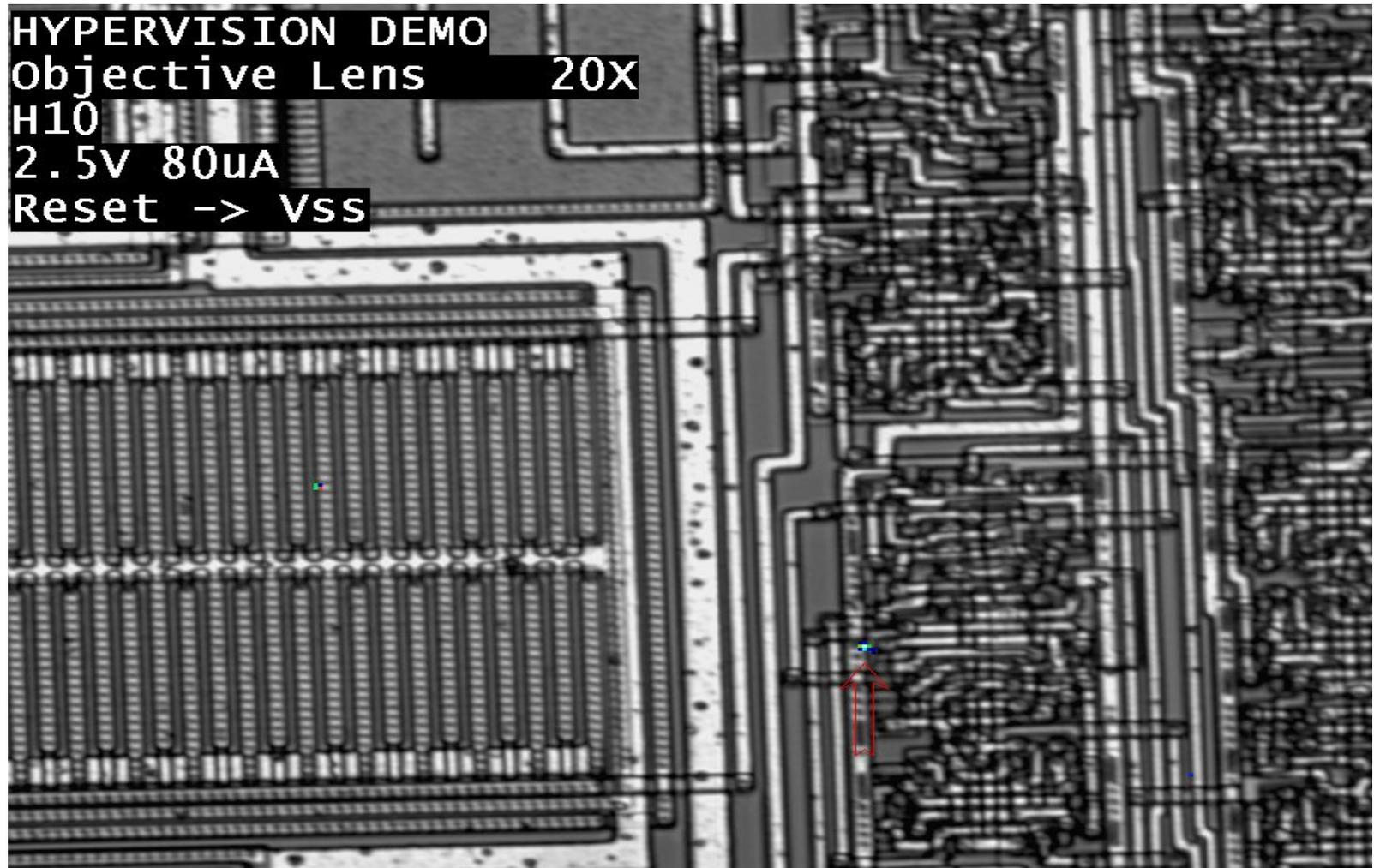
非本征击穿

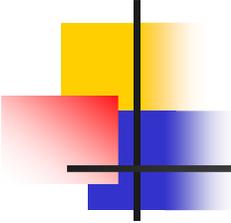


非本征击穿



栅氧化层击穿





击穿机理与改进措施

击穿机理

三个阶段：建立阶段，热电反馈阶段，击穿阶段（如蚁穴溃坝）

两种解释：隧穿，积累

改进措施

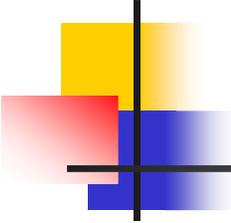
注意原材料中杂质的含量

洁净措施，防止沾污

二步或三步氧化：干-湿 干-湿-干

掺氯氧化

防静电损伤



3.4 电迁移

电迁移现象：

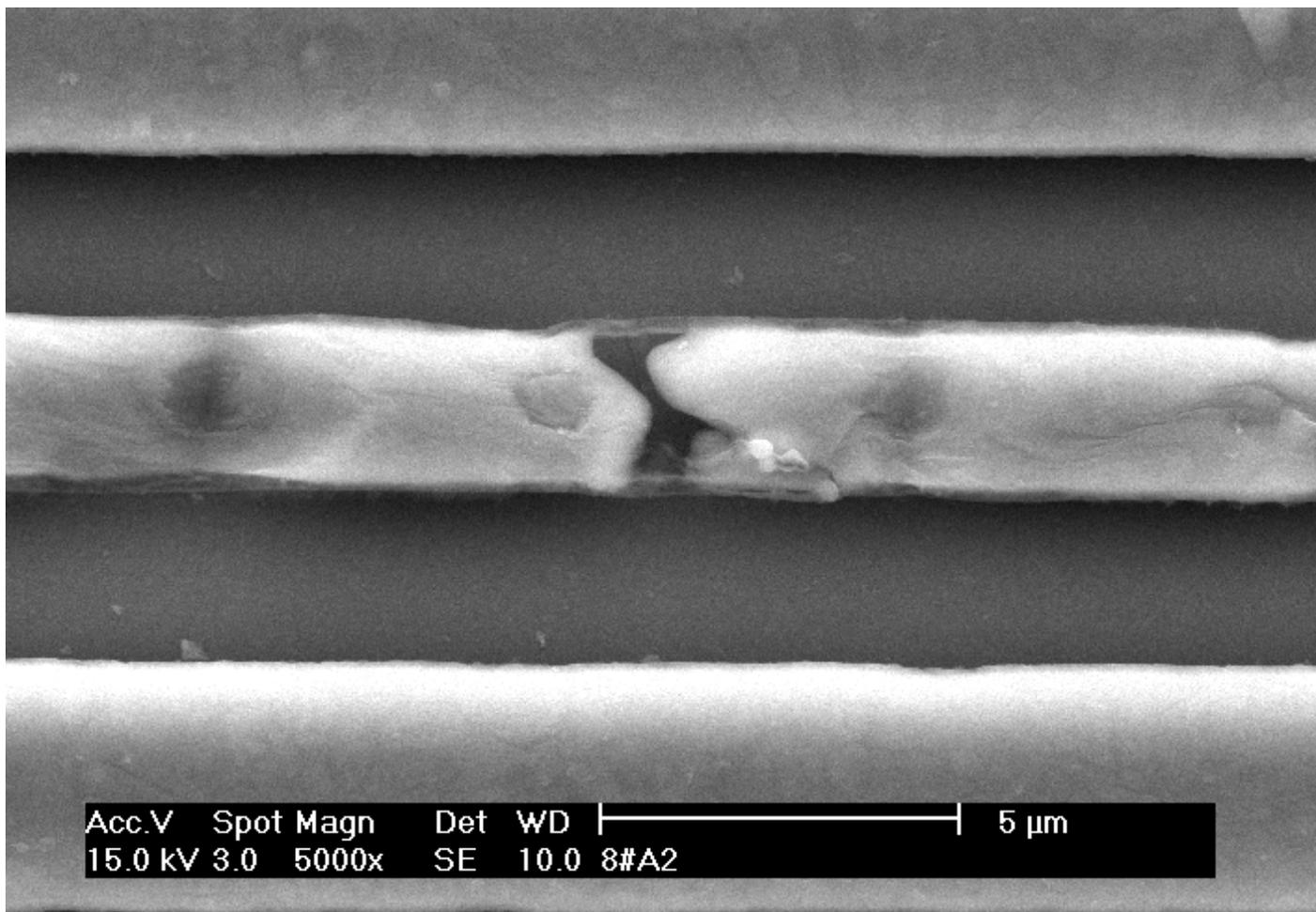
金属离子沿电荷方向产生质量的运输的现象。

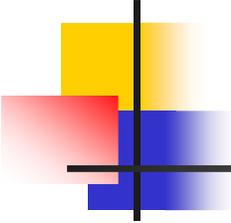
电子风（风）吹动了原子（石头）

影响因素：

1. 布线几何形状 台阶 拐弯
2. 热效应
3. 晶粒大小
4. 介质膜
5. 合金 加入Si Cu等
6. 脉冲电流 直流情况

铝线电迁移开路





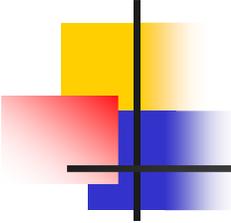
失效模式及防止措施

失效模式:

短路 开路 参数退化

防止措施:

1. 设计
2. 工艺
3. 材料
4. 多层结构
5. 覆盖



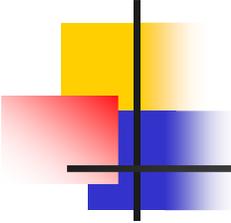
铝膜再构 应力迁移

- 铝膜再构（厚铝）

热循环或功率老化，类似电迁移，
但机理主要是热应力引起

- 应力迁移（薄铝）

与电迁移区别，但实际中比较难区别。



3.5 与铝有关的界面效应

- 铝与二氧化硅

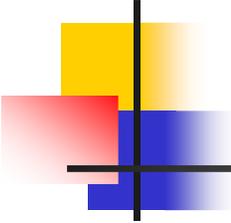


- 克服措施:

版图设计时考虑热分布均匀，散热好，热阻低。

采用如 $\text{SiO}_2\text{—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$ 或 $\text{Si}_3\text{N}_4\text{—SiO}_2$ 复合钝化层。

用双层金属如 Ti—Al 、 W—Al 等代替单一铝互连线。



铝与硅

物理过程

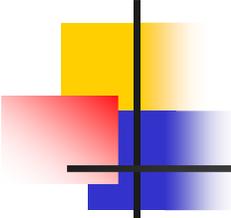
- (1)形成固溶体
- (2)硅在铝中的电迁移
- (3)铝在硅中电热迁移

失效模式

- E-B**结退化
- 铝肖特基二极管失效
- 结间短路

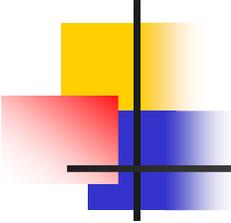
防止措施

- 采用硅铝丝代替铝
- 多层金属化
- 加阻挡层



金与铝

- 金引出线与铝互连线间或铝键合丝与管壳镀金引线的键合处，产生**Au—Al**界面接触，由于这两种金属的化学势不同，经长期使用或**200℃**以上高温存贮后将产生多种金属间化合物，如**Au₅Al₂**、**Au₂Al**、**Au₄Al**、**AuAl**、**AuAl₂**等，其晶格常数和热膨胀系数均不相同，在键合点内产生很大应力，电导率较低。**Au—Al**反应造成**Al**层变薄，粘附力下降，造成半断线状态，接触电阻增加，最后导致开路失效。
- **AuAl₂**发紫色叫紫斑；而 **Au₂Al**呈白色，叫白斑，性脆，易产生裂纹引起开路。
- **Au—Al**接触在**300℃**以上高温下容易发生空洞，这叫**Kirkendall**效应。这是高温下金向铝中迅速扩散并形成**Au₂Al**的结果，它在键合点四周出现环形空洞，使铝膜部分或全部脱离，形成高阻或开路。
- 金—铝键合处开路失效后，在电测试中又会恢复正常，表现出时通时断现象，此时可进行高温(**200℃**以上)存贮，观察开路失效是否再次出现来确定。



3.6 热电效应

热阻:

传热能力。结温与寿命关系密切。

尽量降低梯度，热源分配合理

热应力:

破坏性失效——过热烧毁

热疲劳——龟裂，虚焊等，时好时坏

二次击穿

现象:

- 在某个工作点, 电压突然上升, 电流突然增大, 出现负阻, 若无保护, 器件将被烧毁。(热击穿, 还不到雪崩击穿的时候)
- 与雪崩击穿不同(电击穿, 可恢复)
- 雪崩击穿是在电场作用, 载流子能量增大, 不断与晶体原子相碰, 使共价键中的电子激发形成自由电子-空穴对。新产生的载流子又通过碰撞产生自由电子-空穴对, 这就是倍增效应。1生2, 2生4, 像雪崩一样增加载流子。

防止:

- 设计——限流
- 工艺——缺陷
- 使用——安全区

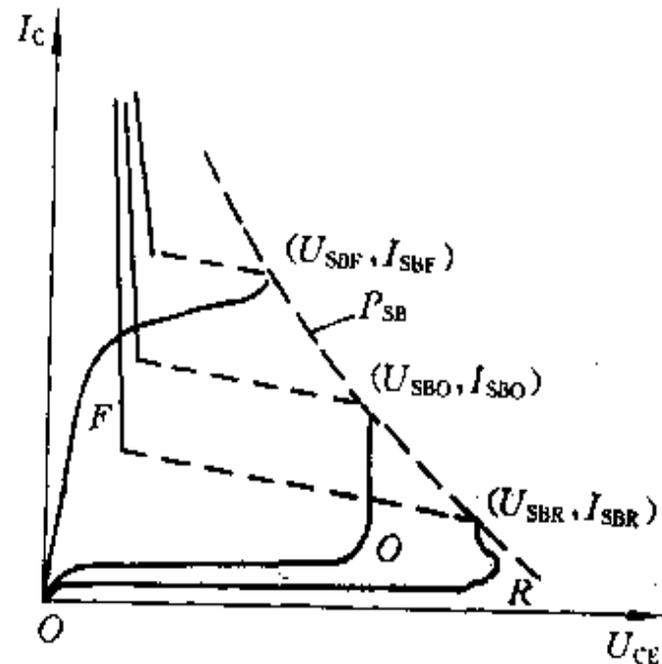


图 3.17 双极功率晶体管发射结正偏 $F(I_B > 0)$ 反偏 $R(I_B < 0)$ 和基极开路 $O(I_B = 0)$ 时的二次击穿曲线

补充材料：热击穿 电击穿

PN结击穿特性（图）

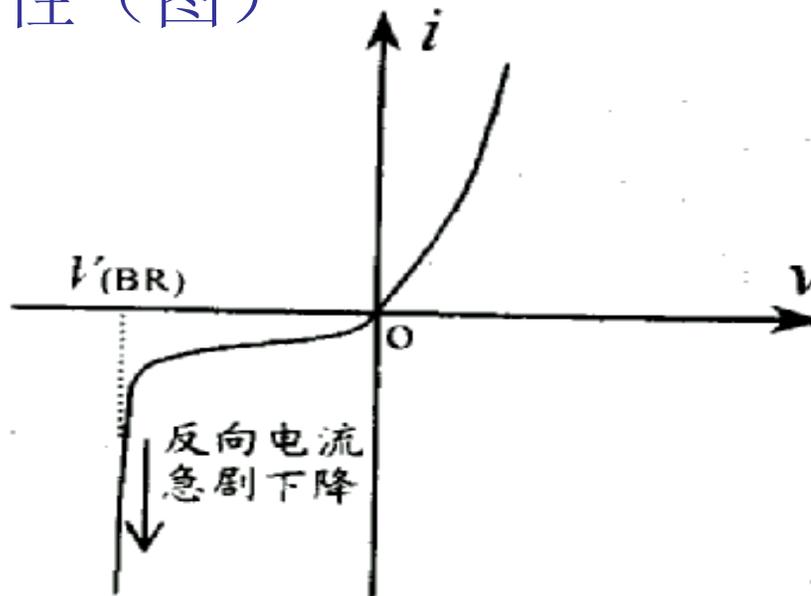
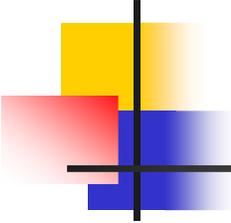
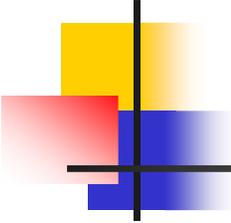


图 1.2.12 PN 结的击穿特性



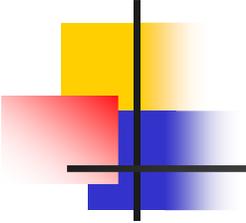
PN结击穿

- PN结击穿有 两种
 - 热击穿
 - 电击穿



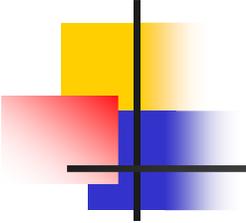
1、电击穿

- 电击穿是 **可逆的**（可恢复，当有限流电阻时）。
- 电击穿有两种机理机理 可以描述：
 - 雪崩击穿
 - 齐纳击穿



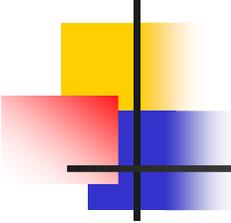
(1) 雪崩击穿

- 特点如下：
 - 低掺杂，
 - PN结宽，
 - 正温系数，
 - 常发生于大于7伏电压的击穿时（雪崩效应）



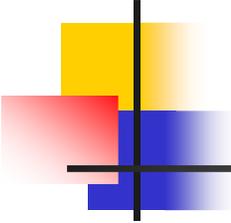
(2) 齐纳击穿

- 特点如下：
 - 高掺杂，
 - PN结窄，
 - 负温系数，
 - 常发生于小于5伏电压的击穿时（隧道效应）



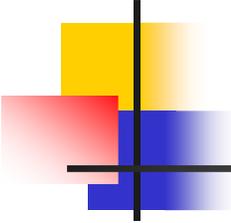
特殊情况

- 在（5~7）V击穿发生时，两种击穿机理都有。
- 温度系数可达到最小。



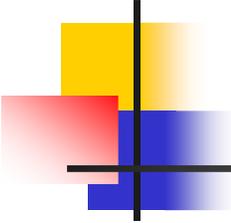
2、热击穿

- 电击穿后如无限流措施，将发生热击穿现象。
- 热击穿会破坏PN结结构（烧坏）
- 热击穿是 不可逆 的。



二次击穿

- 除以上击穿现象外，还有一种特殊的击穿现象，即 **二次击穿**。
- 二次击穿的特点是管子不发热。
- 二次击穿是 **不可逆** 的。



本次课完

- 回顾讲过的内容。