

功率快恢复二极管制造技术发展简述

北京工业大学

功率半导体器件与功率集成电路研究室

亢宝位

2008年7月

前言

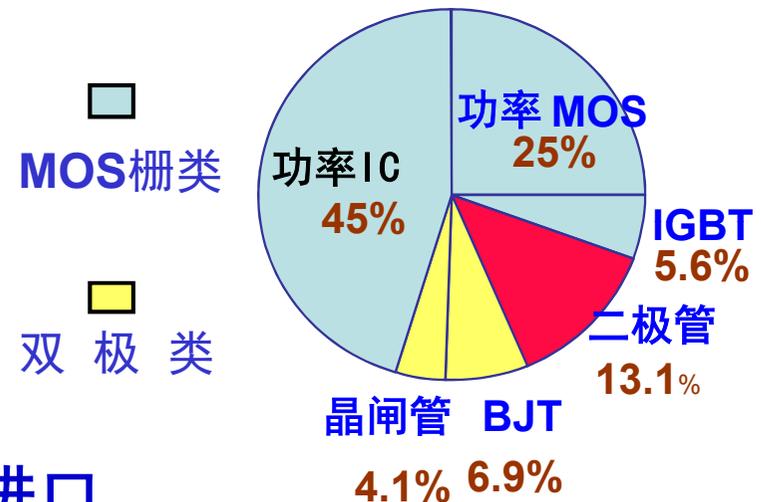
●功率快恢复二极管的地位

◆用途：续流；整流

◆市场份额：大于IGBT

世界：~25亿美金

中国：~70亿元人民币



●我国生产现状：

占主流的高端产品几乎全部进口

●我国研究现状：

◆研发几百至几十ns超快恢复二极管者鲜见

◆北京工业大学一直致力于超快恢复FRD和IGBT研发

梗概

- 一. 绪论: 快恢复二极管的**用途**与对它的**性能要求**
- 二. 快恢复二极管结构发展之一: **PN**二极管结构发展
- 三. 快恢复二极管结构发展之二: **PN /肖特基**结合二极管结构发展
- 四. 过剩载流子**寿命控制技术**的发展
- 五. 制造功率快恢复二极管的**半导体材料**的发展
- 六. 我国快恢复二极管**产业技术现状**
- 七. 结束语

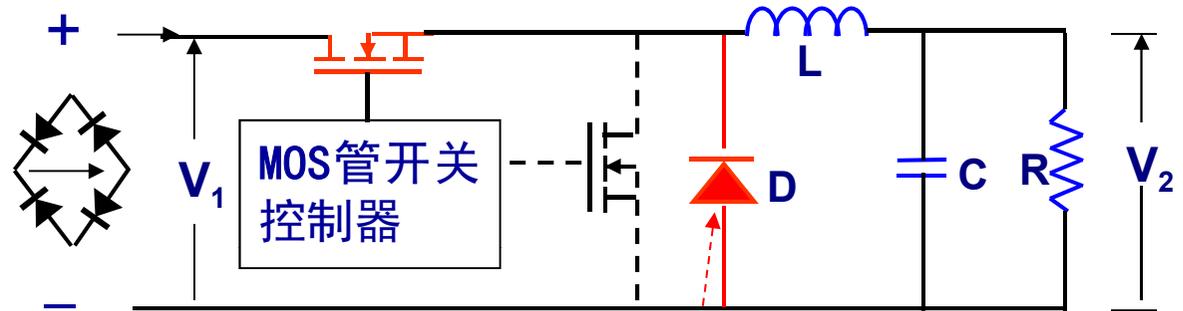
一. 绪论

快恢复二极管的用途 与对它的性能要求

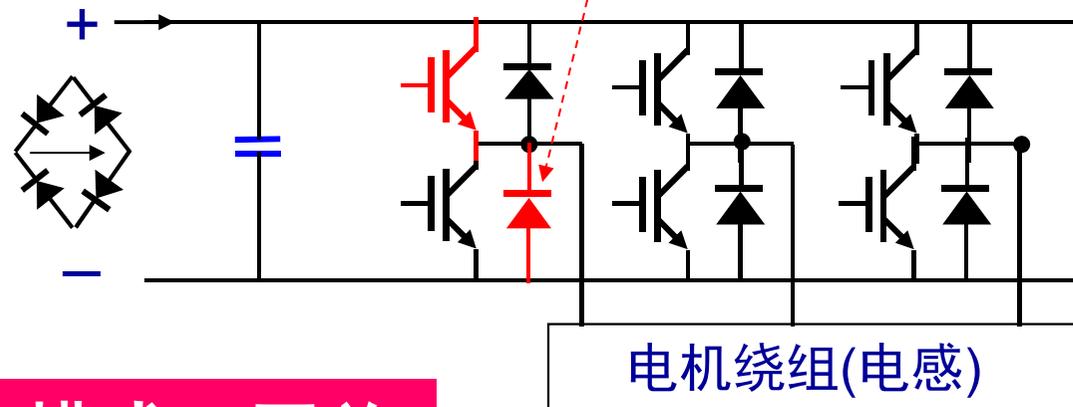
1. 快恢复二极管主要用途

- 主要是续流二极管(FWD)
- 其次是整流二极管

主要应用例一：
开关电源
降压电路

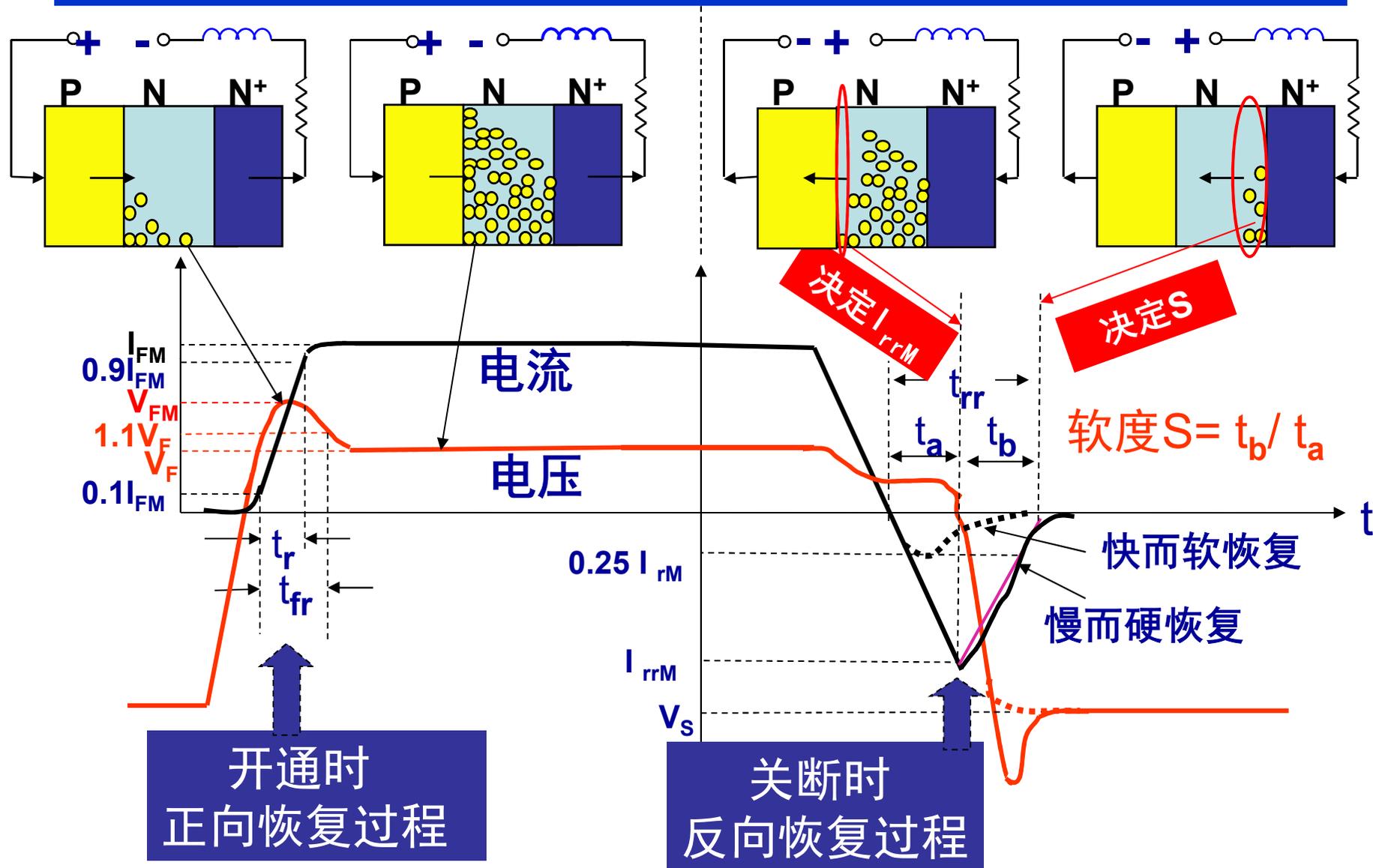


主要应用例二：
电机调速
逆变电路

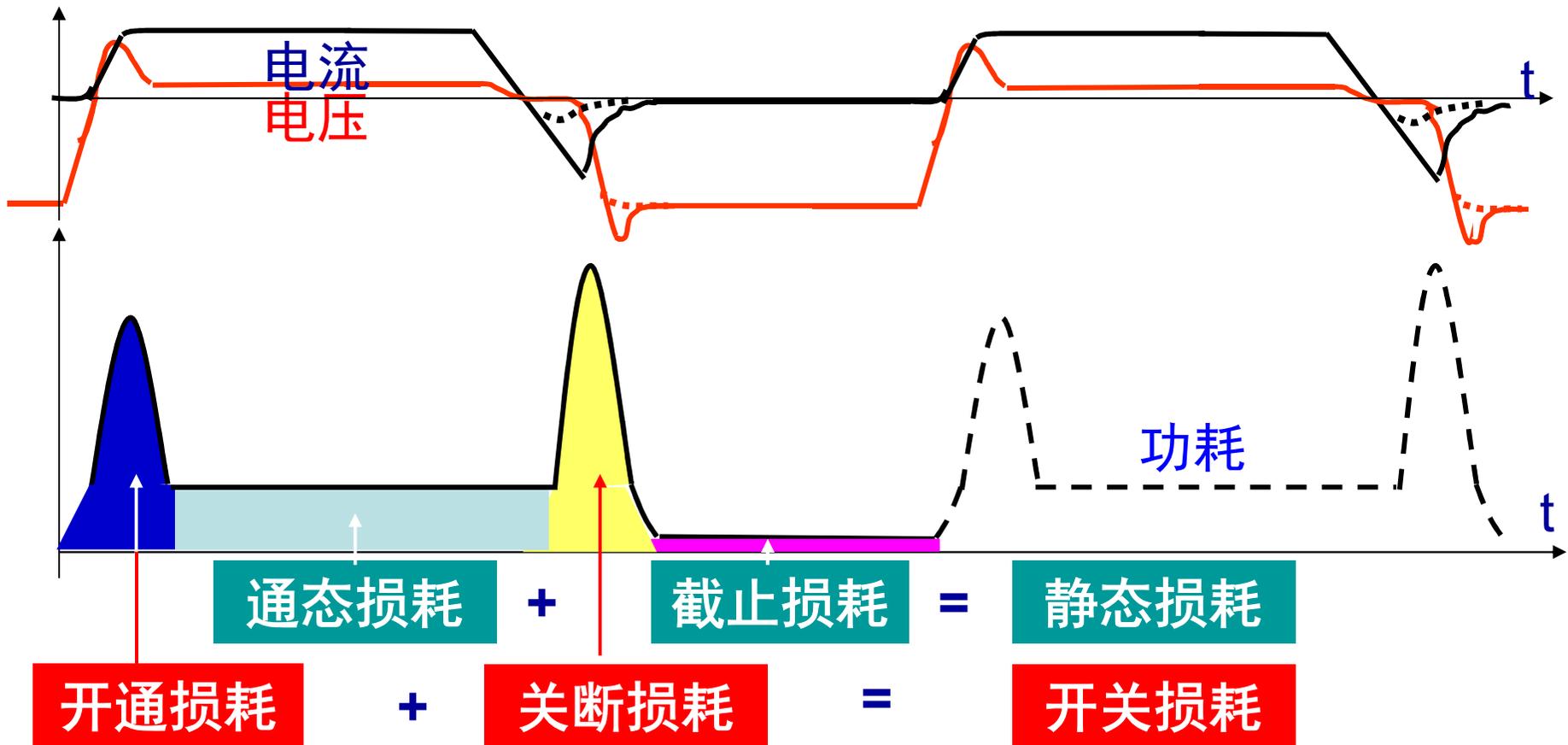


工作模式：开关

2. 快恢复二极管的开关波形与参数



快恢复二极管的功耗



◆ 高频工作时开关损耗为主



快恢复二极管

◆ 低频工作时静态损耗为主



一般恢复二极管

3. 对快恢复二极管主要性能要求

主要目的：降低功耗；保护主开关IGBT；提高可靠性等

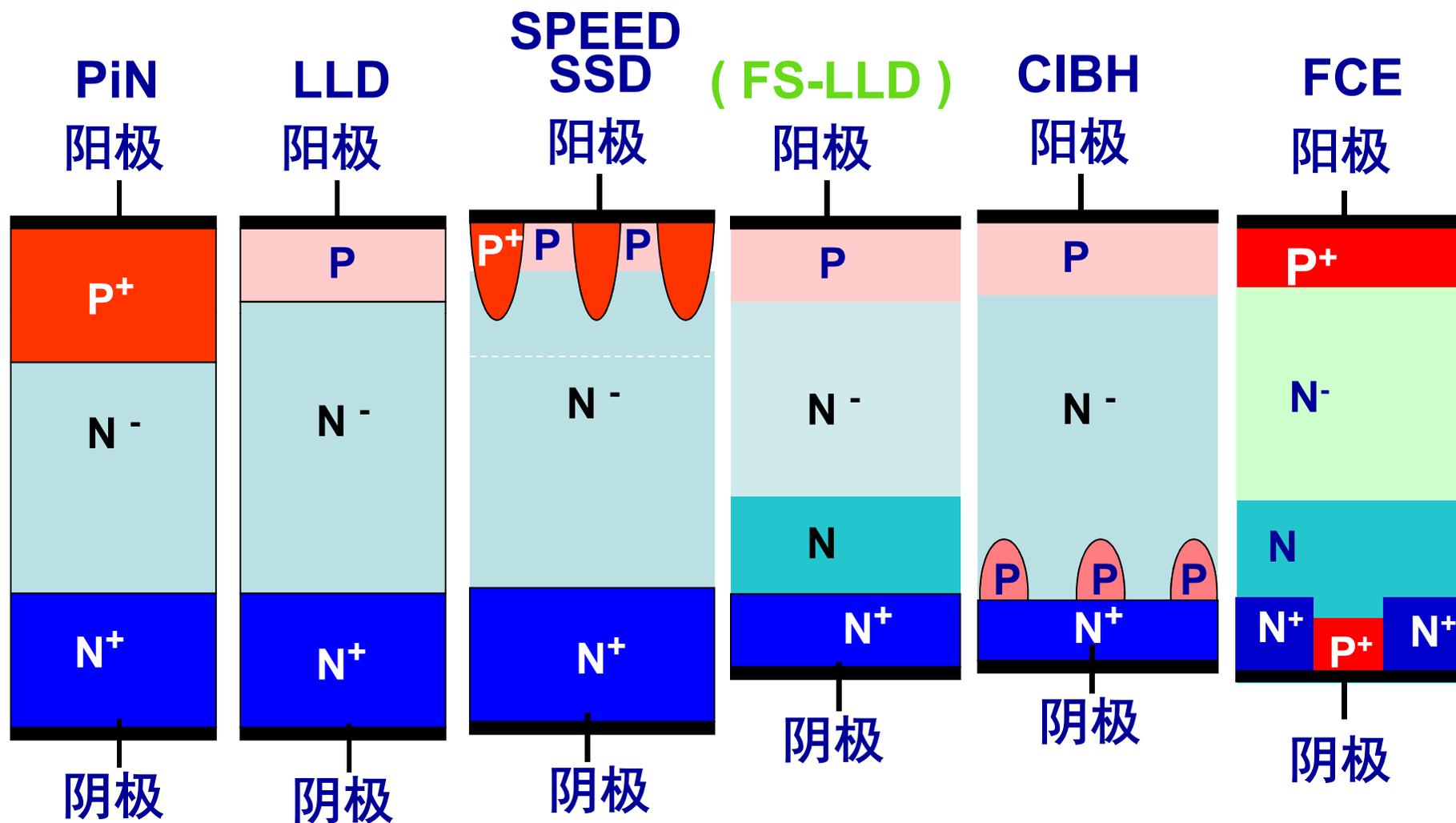
直流参数	正向压降低 反向漏电小	$V_F \downarrow$ $I_R \downarrow$	} 静态损耗 ↓
开关参数	反向恢复电荷少 反向恢复时间短 反向恢复电流峰值小	$Q_{rr} \downarrow$ $t_{rr} \downarrow$ $I_{rrM} \downarrow$	} 开关损耗 ↓ 保护IGBT
	正向恢复电荷少	$t_{fr} \downarrow, V_{FM} \downarrow$	
	反向恢复特性软	$S \uparrow$	} 减小EMI
	正向压降正温度系数	$dV_F/dT > 0$	} 提高电力电子设备可靠性

功率快恢复二极管发展史主要是以上性能的改进史！

二. 快恢复二极管结构发展之一： PiN二极管结构发展

- 1, 常规PiN二极管 (**PiN** 1950's)
- 2, 低损耗二极管 (**LLD** 1976)
- 3, 静电屏蔽二极管 (**SSD** 1984)
- 4, 场中止低损耗二极管 (**FS-LLD** 2007)
- 5, 背注入空穴二极管 (**CIBH** 2006)
- 6, 场抽出电荷二极管(**FCE** 2005)
- 7, 浮带区熔二极管 (**FZ-Diode** 2008)
- 8, 超级结二极管 (**SJ-diode**)

各种 PiN 二极管结构一览



1, 常规 PiN 二极管



特点：耐压高,可以按需要随心所欲设计 几十V → 6500V

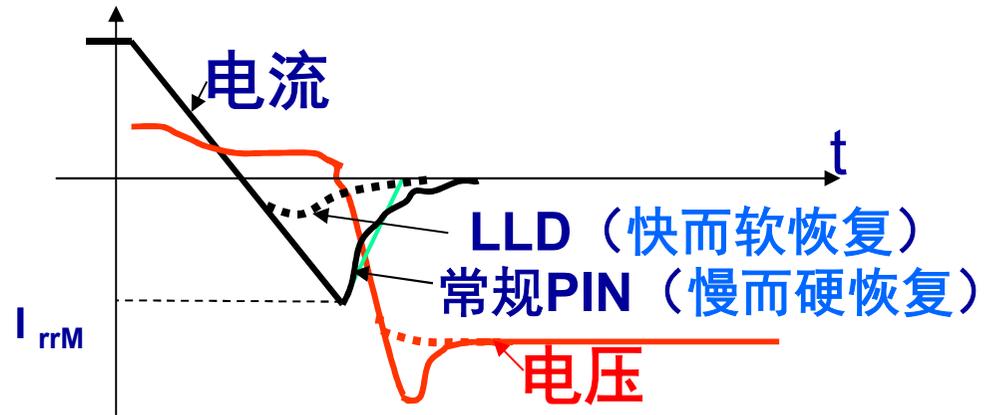
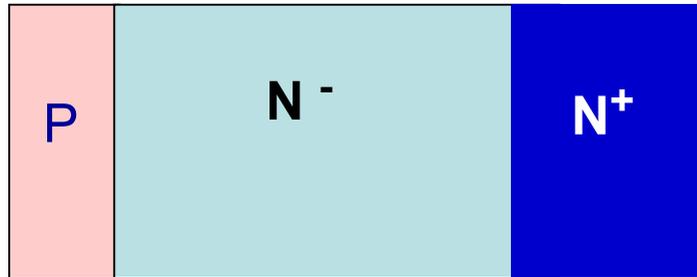
缺点：有少数载流子存储效应, 所以:

开关时间长
反向恢复硬
正向压降大

用常规寿命控制法提高速度时
三者相互矛盾, 难以得到良好折衷

以后 PiN二极管的发展史主要就是提高其折衷性能的历史

2, 低损耗二极管 (LLD)



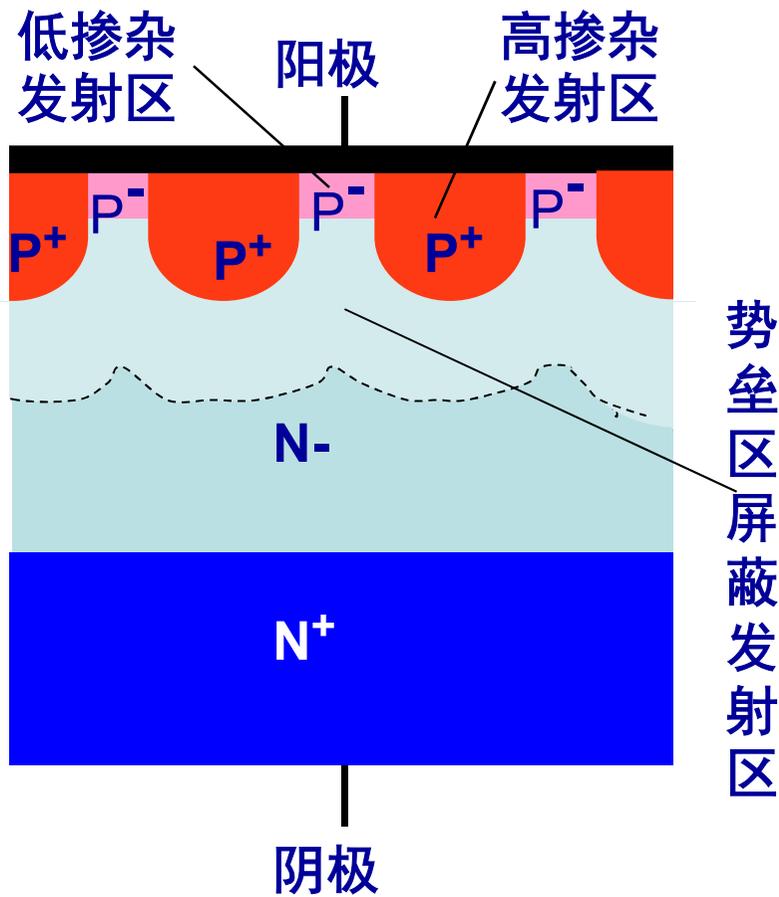
结构特点：低发射区掺杂浓度

性能优点

- 正向压降小 ← PN结自建电势差减小
- 开关时间短 ← P区注入N-区空穴总量减少
- 反向恢复电流峰值低 ← 近PN结处空穴浓度降低
- 开关特性软 ← 近NN+结处空穴浓度提高

问题：反向特性变软，击穿电压降低，限制它充分应用

3, 静电屏蔽二极管 (SSD, SPEED)



结构特点

- 低发射区掺杂
- 深结静电屏蔽

性能特点

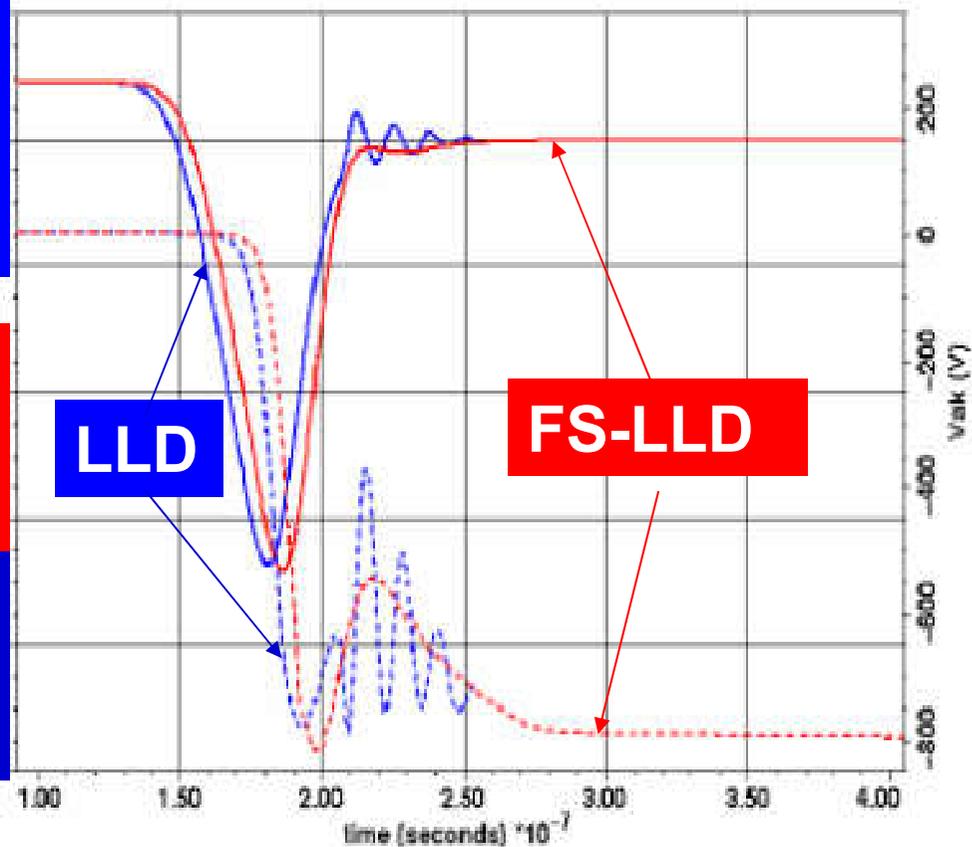
- 正向压降小
- 反向恢复快,软
- 耐压提高
漏电减小
- 发射极效率自调整

4, (场中止低损耗二极管, FS-LLD)



结构特点: LLD + N缓冲层

性能特点: 更软恢复

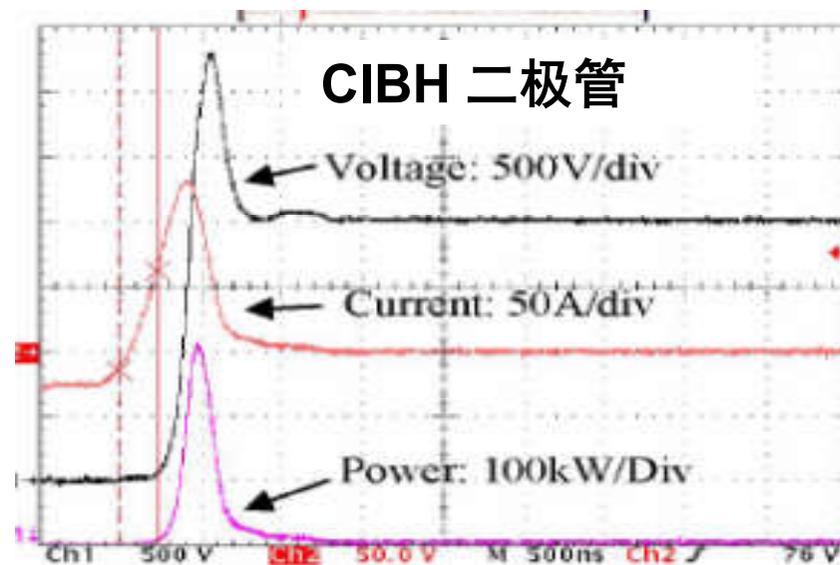
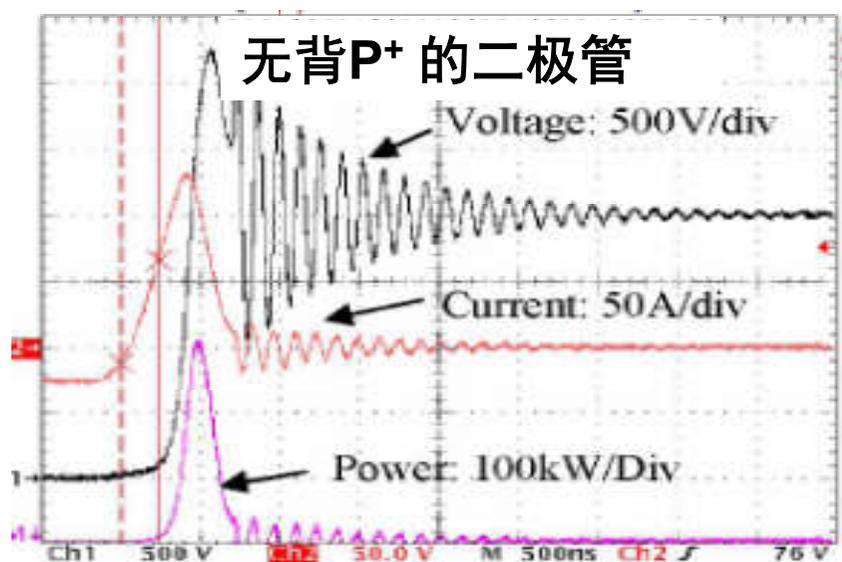


5, 背注入空穴二极管 CIBH



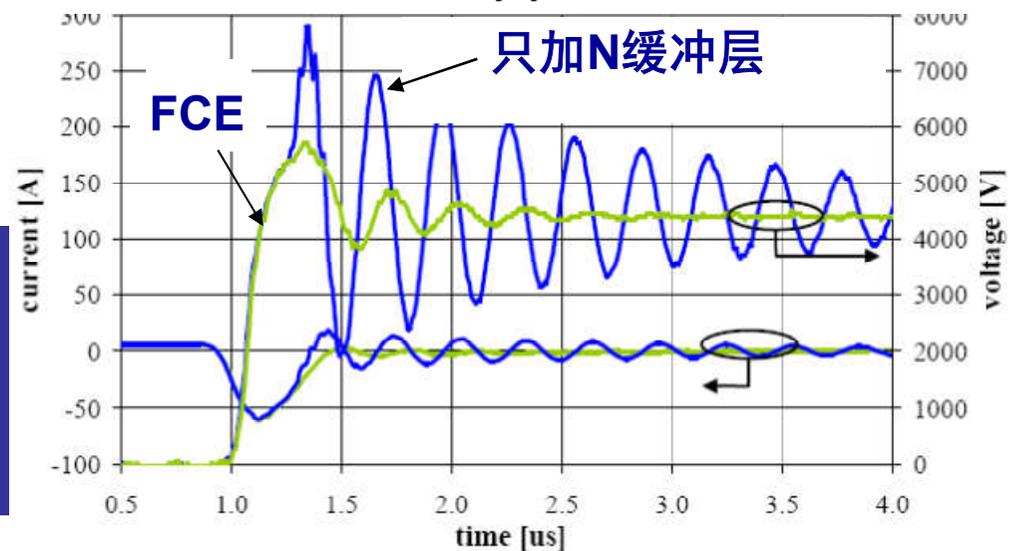
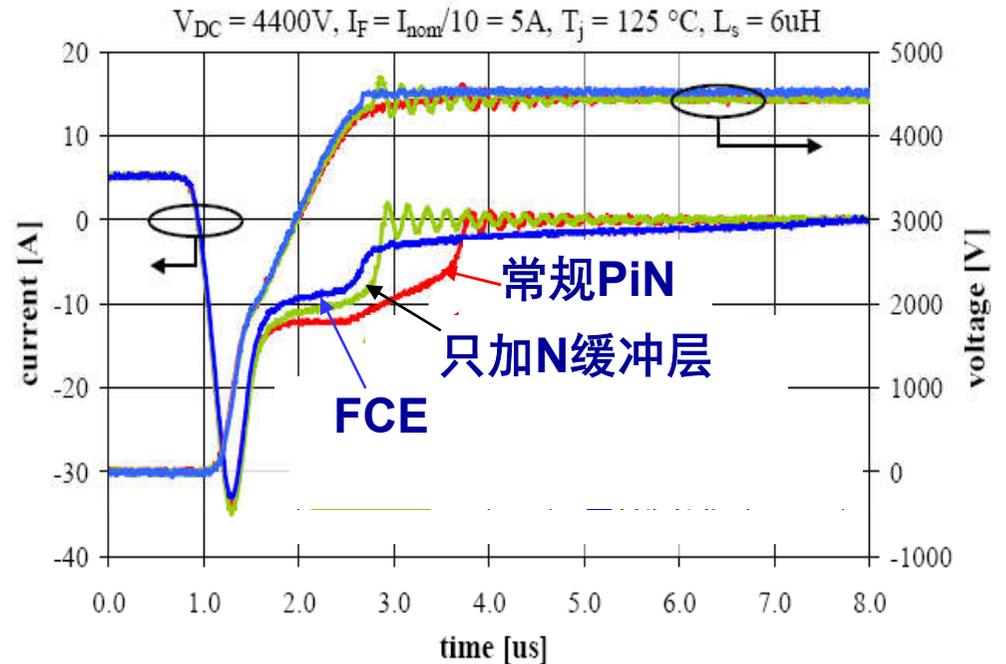
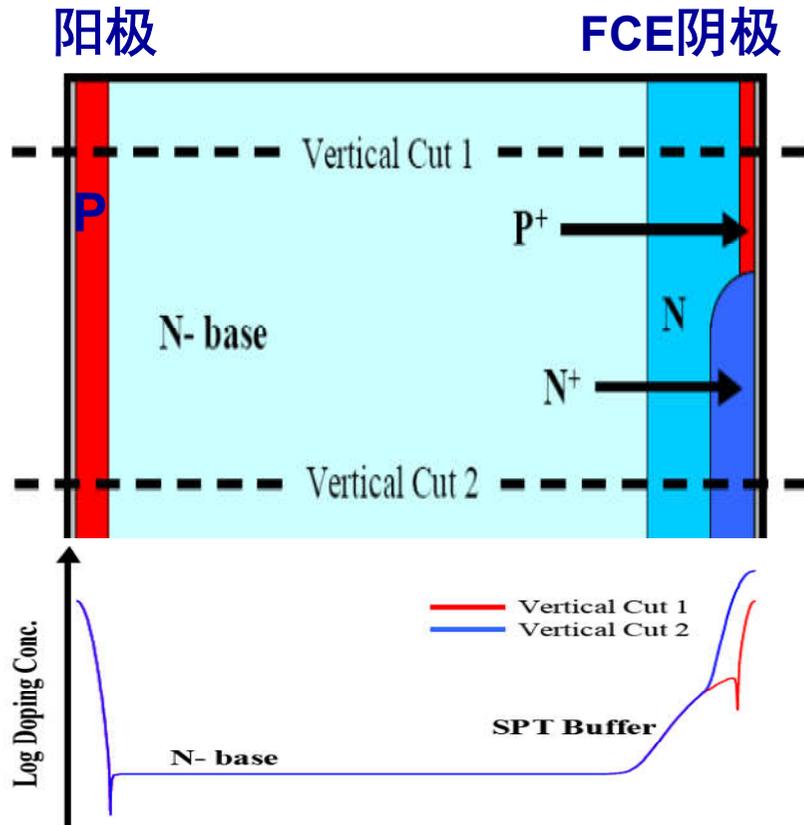
结构特点：加入背P⁺区

性能特点：反向恢复更软



反向恢复波形对比

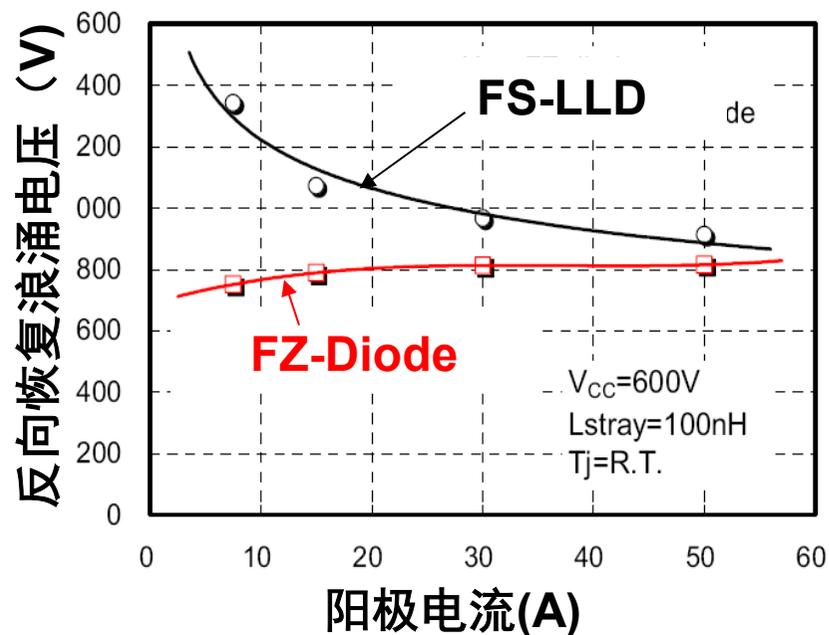
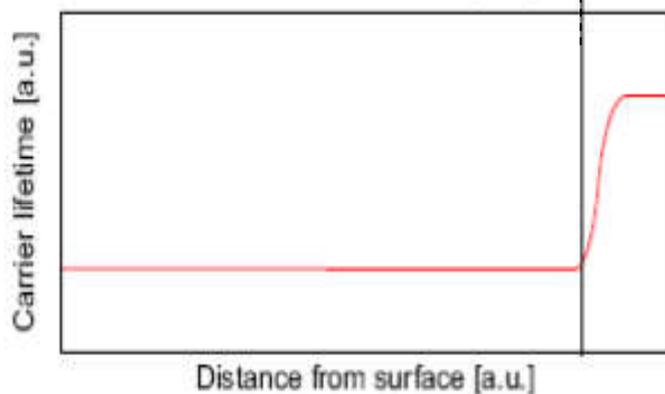
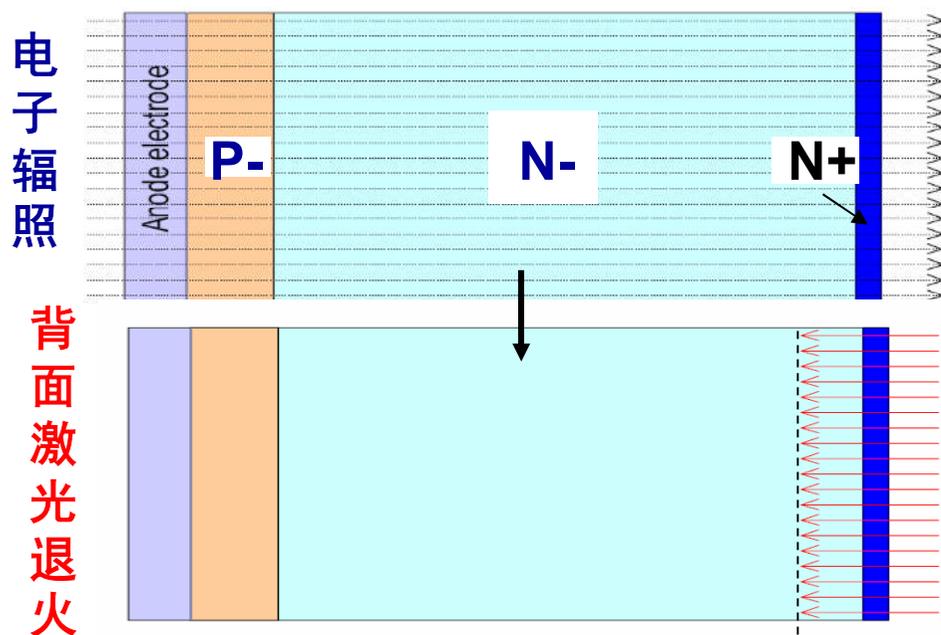
6, 场抽出电荷二极管 (FCE)



结构特点: FS-LLD结合CIBH

性能特点: 反向恢复特软

7, 浮带区熔二极管 (FZ-Diode)

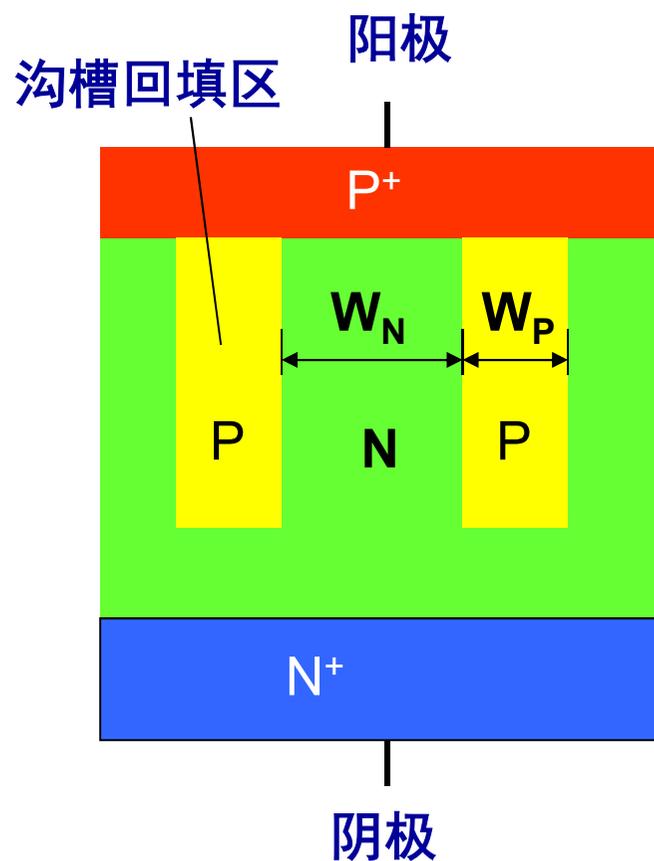


● 成本低 ← 用FZ硅材料

● 反向恢复浪涌电压小

↑
载流子寿命控制
替代 缓冲层

8, 超级结二极管 (SJ-Diode)



结构特点:

$$W_N N_N = W_P N_P$$

横向净掺杂浓度等于零

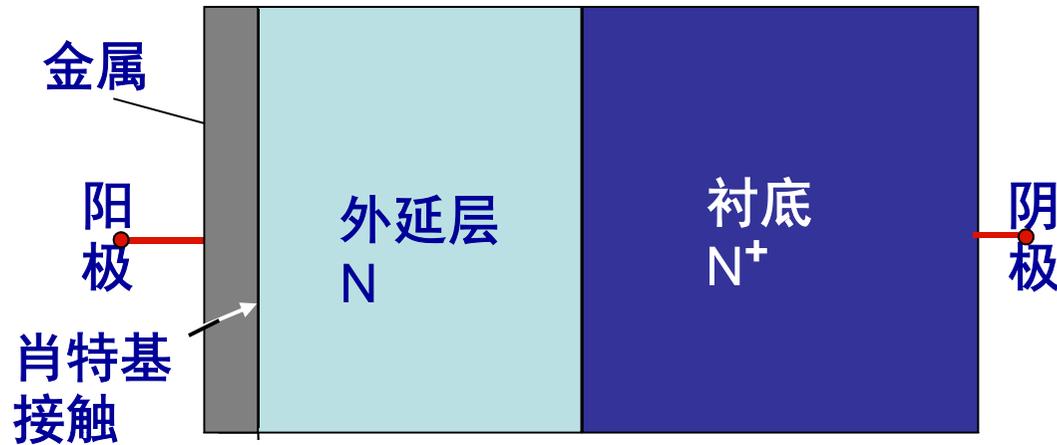
性能特点

正向压降, 反向耐压与开关速度
三者折衷比PIN更好

四. 快恢复二极管结构发展之二: **PN/肖特基**结合二极管 结构发展

- 1, 肖特基/PIN结合二极管 (**MPS** 1993)
- 2, 沟槽氧化物PIN/肖特基二极管
(**TOPS,TSOX-MPS**, 2001)
- 3, 软快恢复二极管 (**SFD** 1991, **U-SFD** 2000)
- 4, 中部宽缓冲层 二极管 (**MBBL** 2004)

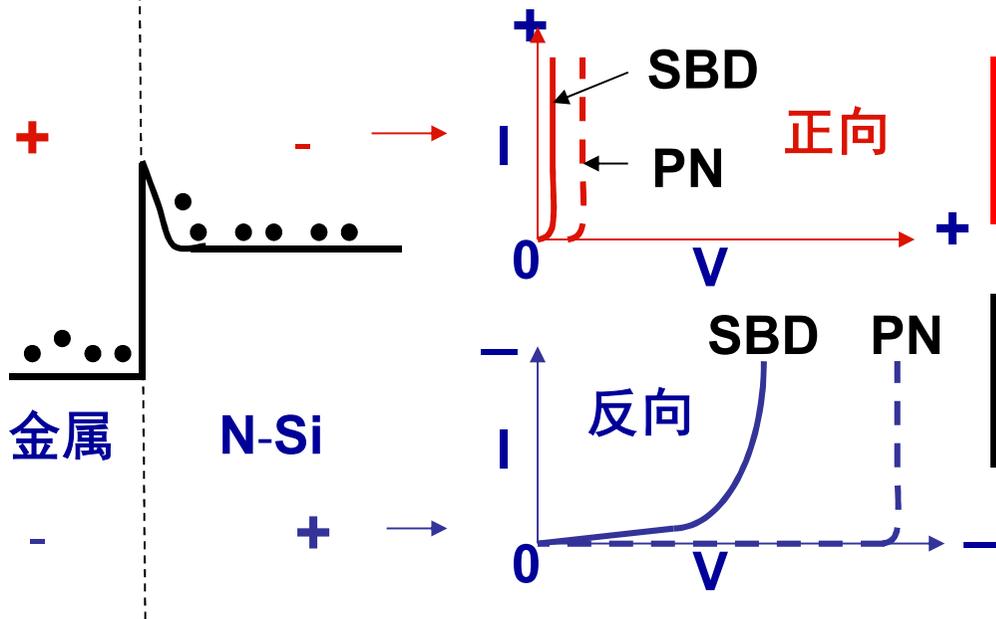
序：肖特基势垒二极管 (SBD)



● 几乎没有恢复时间

● 大电流正向压降大于PiN

多数载流子导电，无少子存储效应

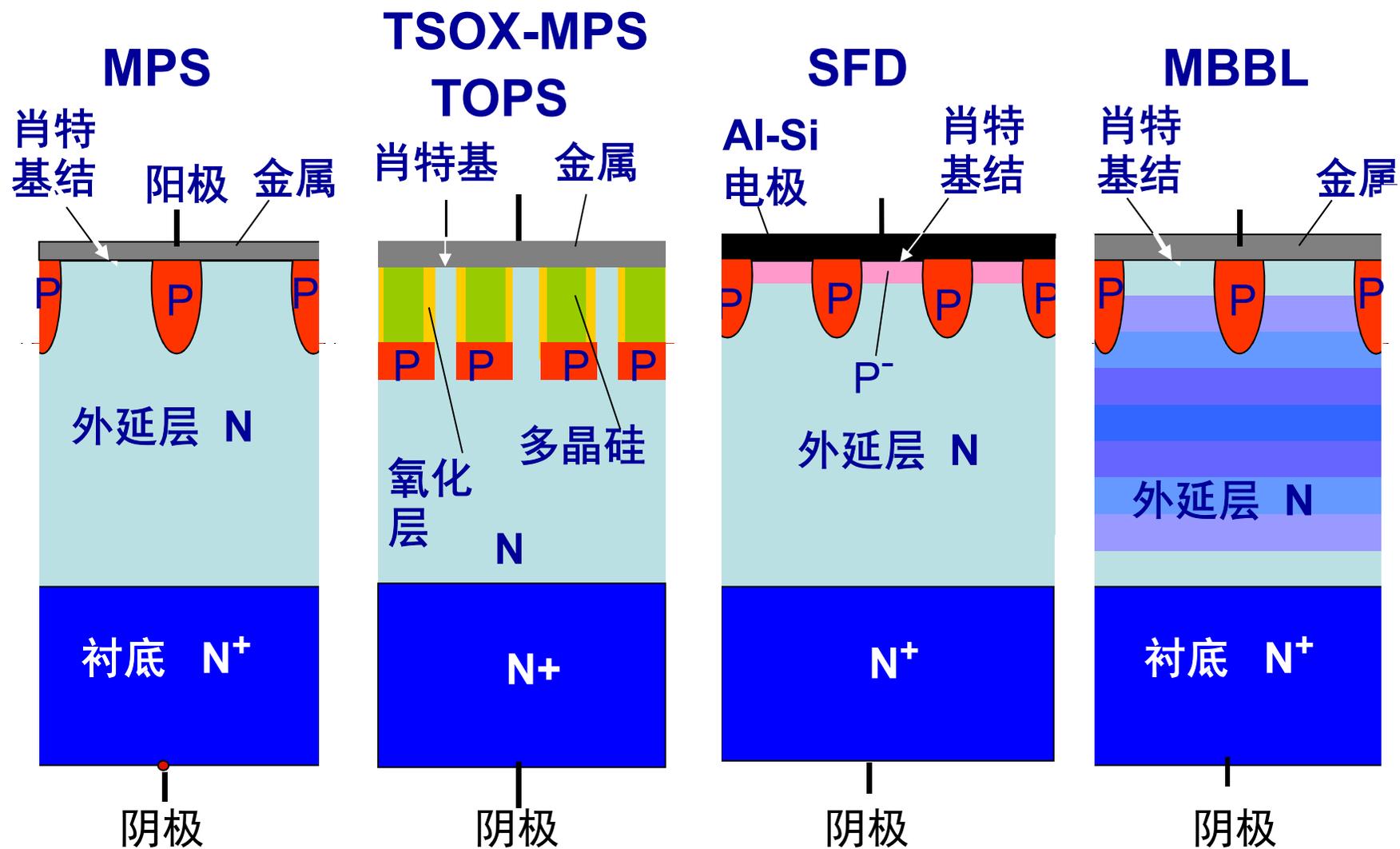


● 正向压降小
~ 0.55V

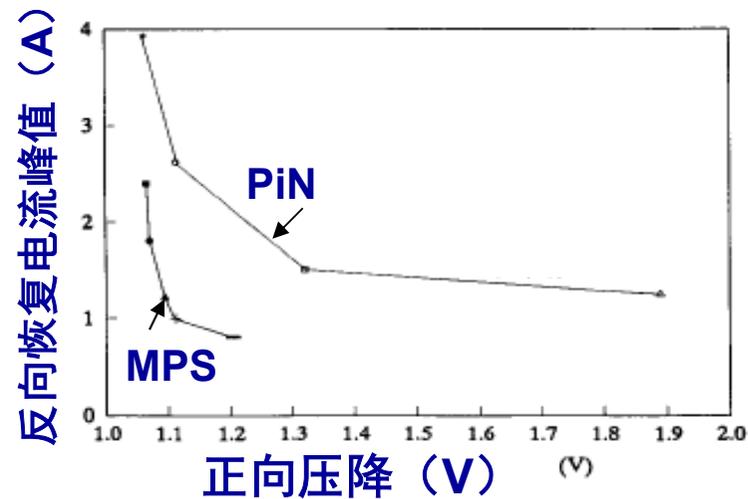
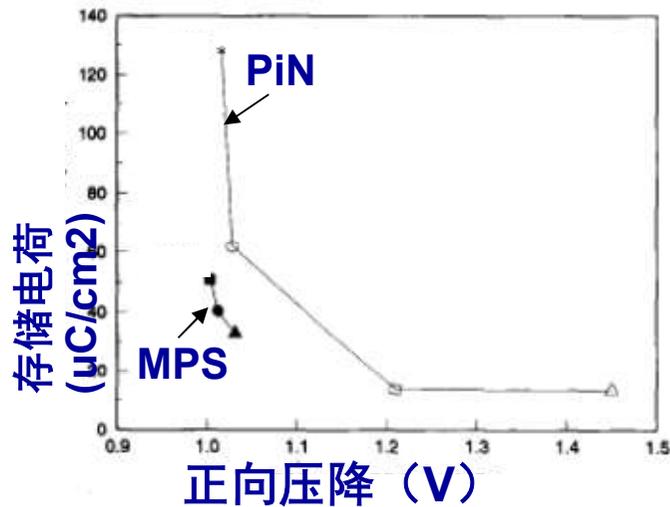
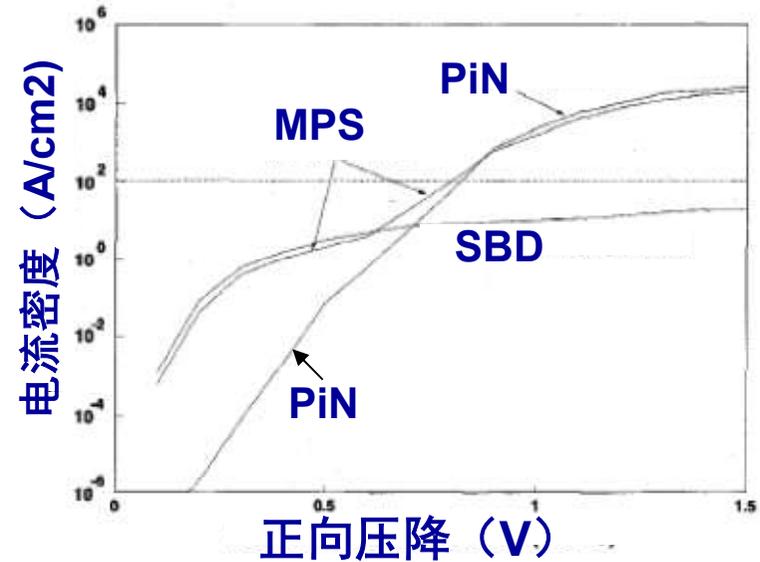
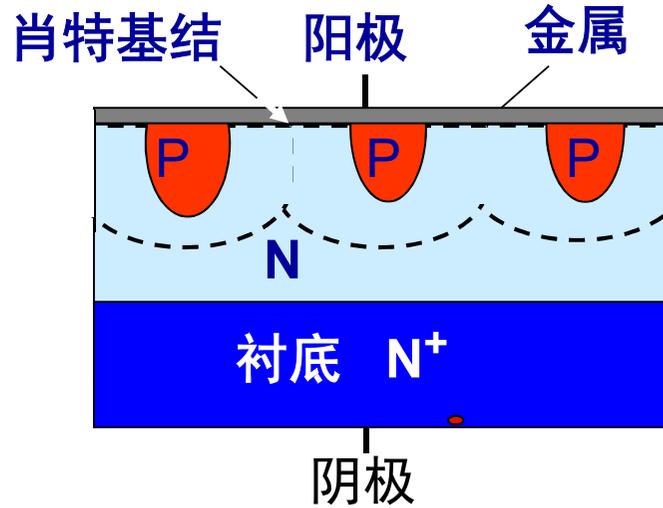
● 反向漏电大
击穿电压低

肖特基势垒高度低于PN结势垒高度

各种PiN/肖特基结合二极管结构一览

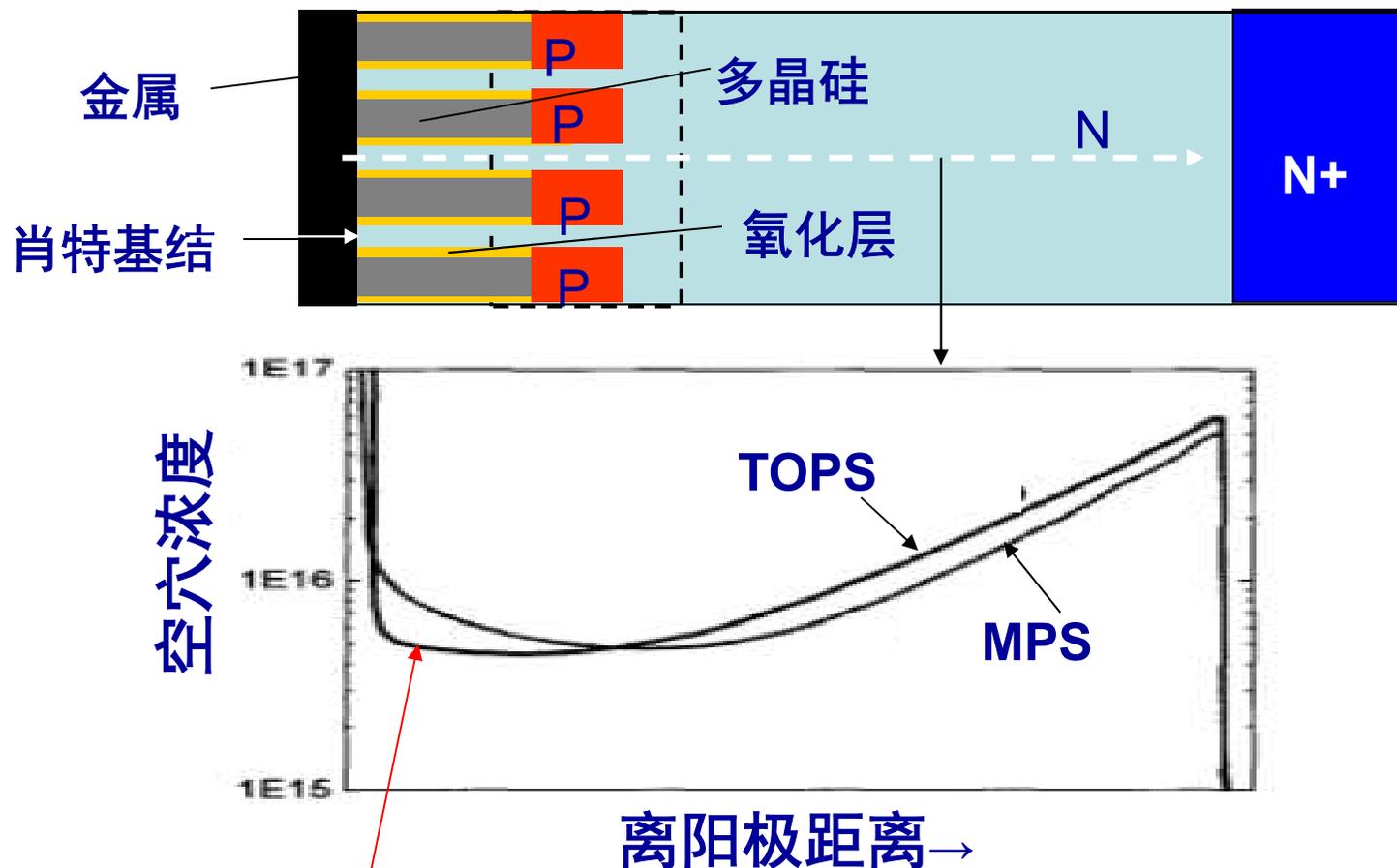


1, PiN/肖特基结合二极管(MPS)



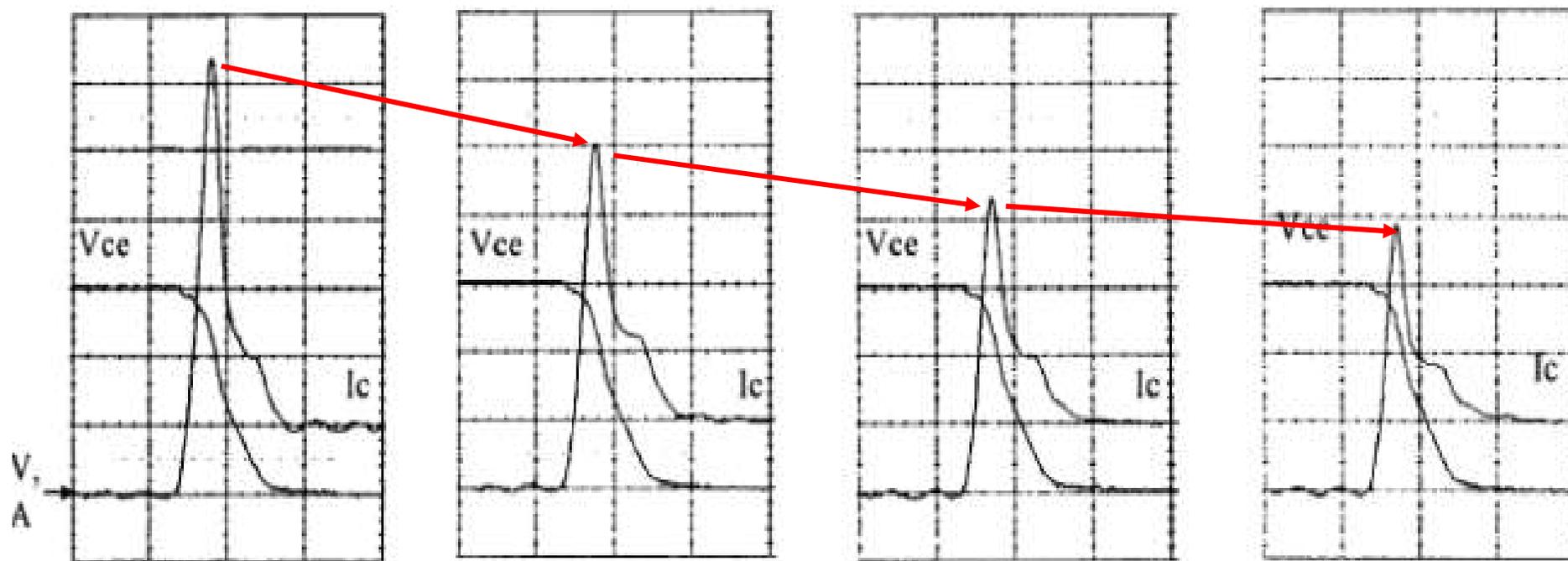
[5]
[6]
[7]
[8]
[9]
[10]

2, 沟槽氧化物PiN/肖特基二极管 (TOPS)



主要优点：反向恢复电流峰值小

IGBT开通波形比较（匹配不同续流二极管时）



续流管 → PiN

MPS

TOPS1

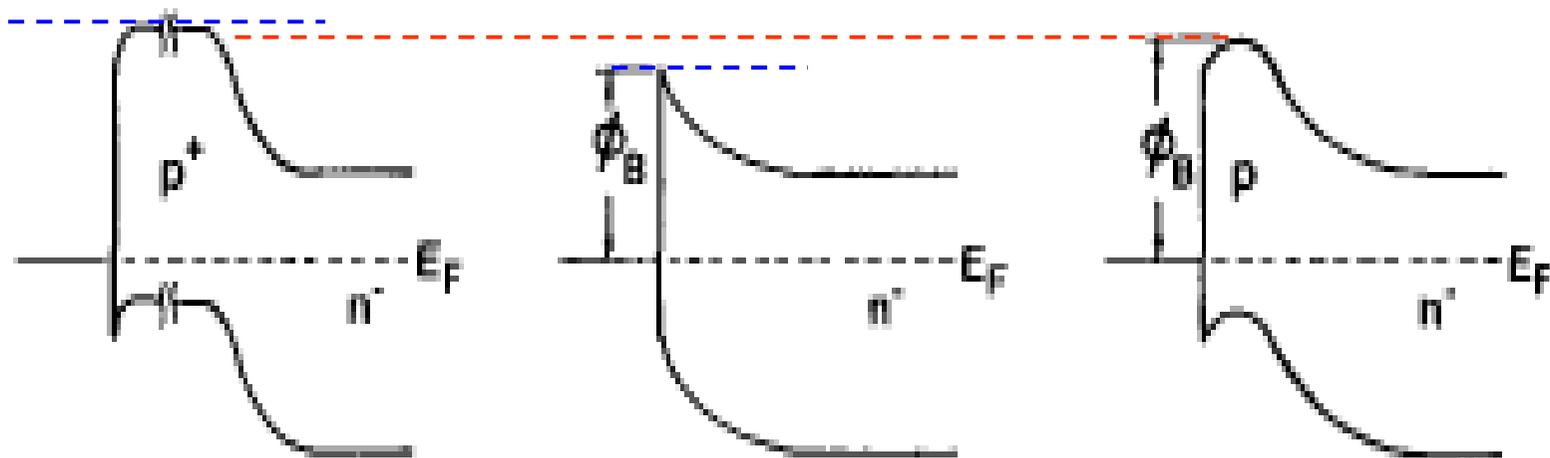
TOPS2

IGBT开通峰值电流依次减小



（叠加在上面的二极管反向恢复电流减小的原因）

3, 软快恢复二极管(SFD)



PiN

肖特基

SFD

结构
特点

加入P-层保护肖特基结
减弱高压感应势垒降低

性能
特点

比MPS漏电流小，耐压高

保留SBD和LLD的反向恢复快软

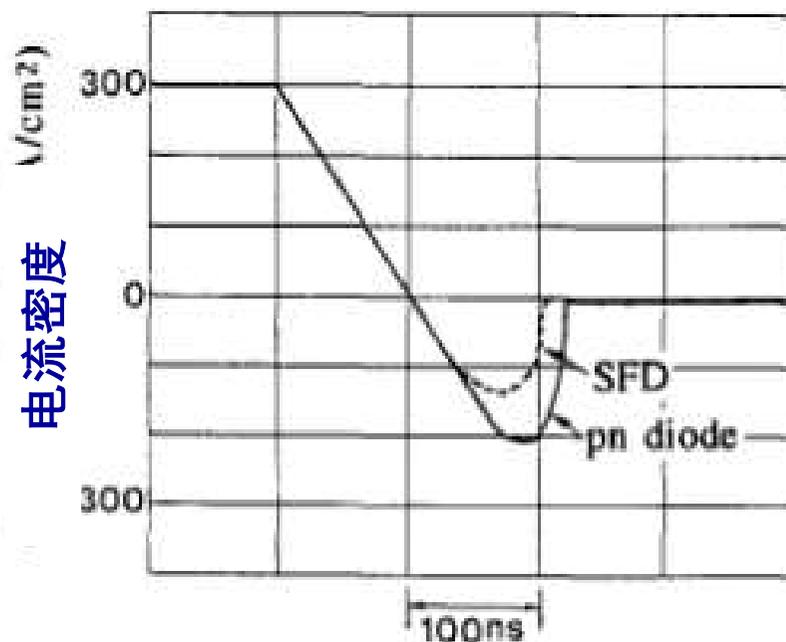
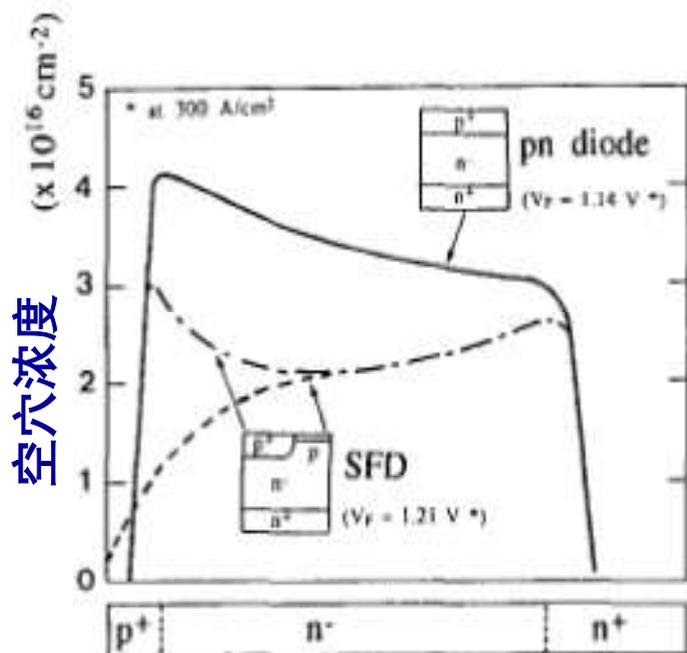
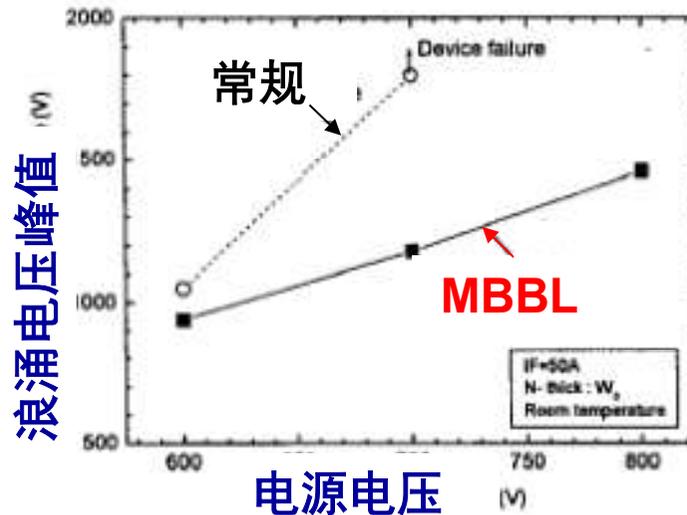
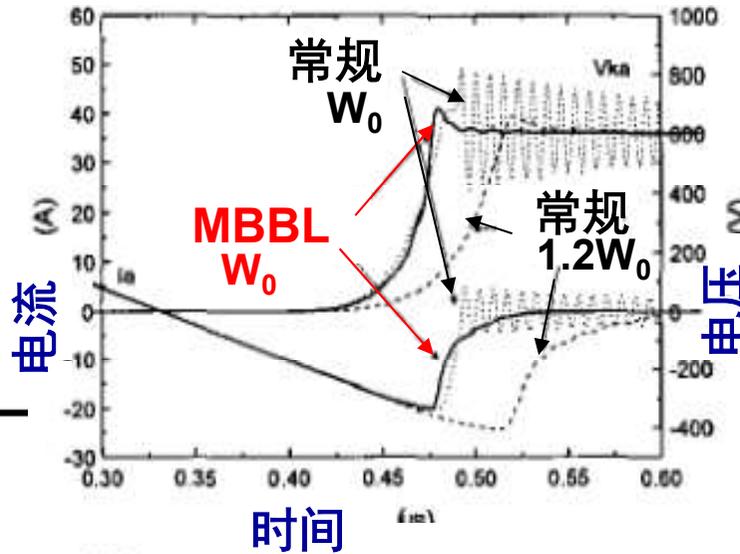
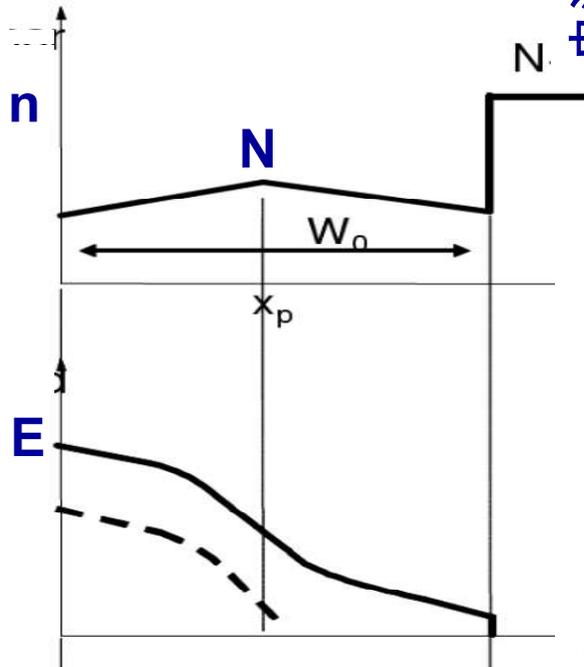
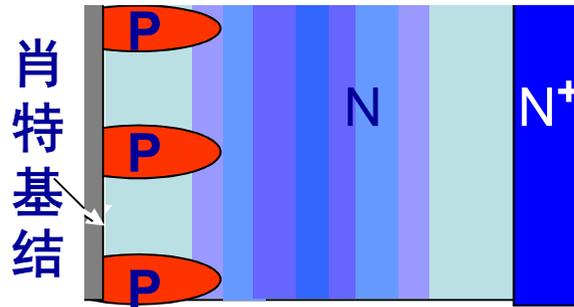


Fig. 5. Excess hole distribution.

4, 中部宽缓冲层二极管 (MBBL)



结构特点

- 中部重掺杂
反向恢复末期耗尽层扩展慢
- MPS阳极

性能特点

- ◆ 反向恢复 软
- ◆ 反向恢复电流峰值低, 浪涌电压小

五. 过剩载流子寿命控制技术发展

1. 均匀与半均匀分布载流子寿命控制技术

(1) 电子等高能粒子辐照（从略）

- 调整辐照剂量寿命可准确调整；正向压降小
- 高温漏电流较大；有时效；超快回复需辐照量太大
- 激光退火可得到半均匀的载流子寿命分布

(2) 铂等重金属热扩散（从略）

- 高温漏电流小；电性能长期稳定高可靠
- 有技术诀窍可得到优异二极管性能

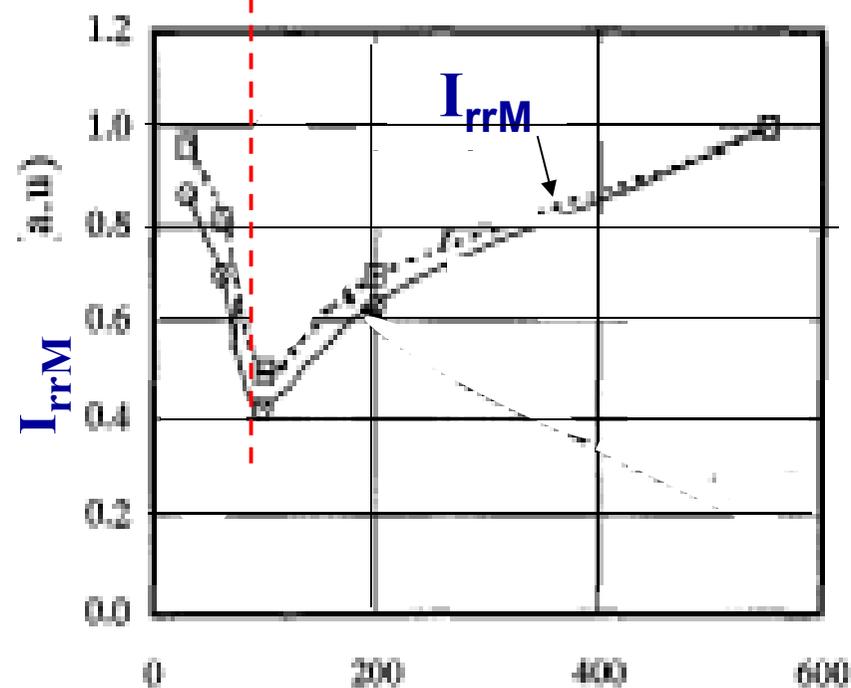
2, 轴向局域载流子寿命控制技术

(1) 优越性:

综合性能最优化

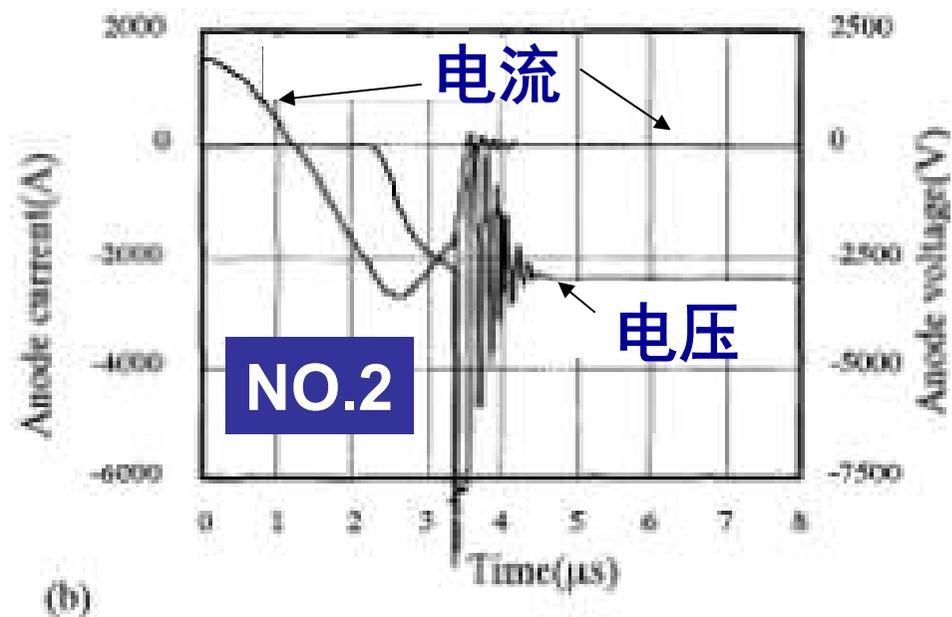
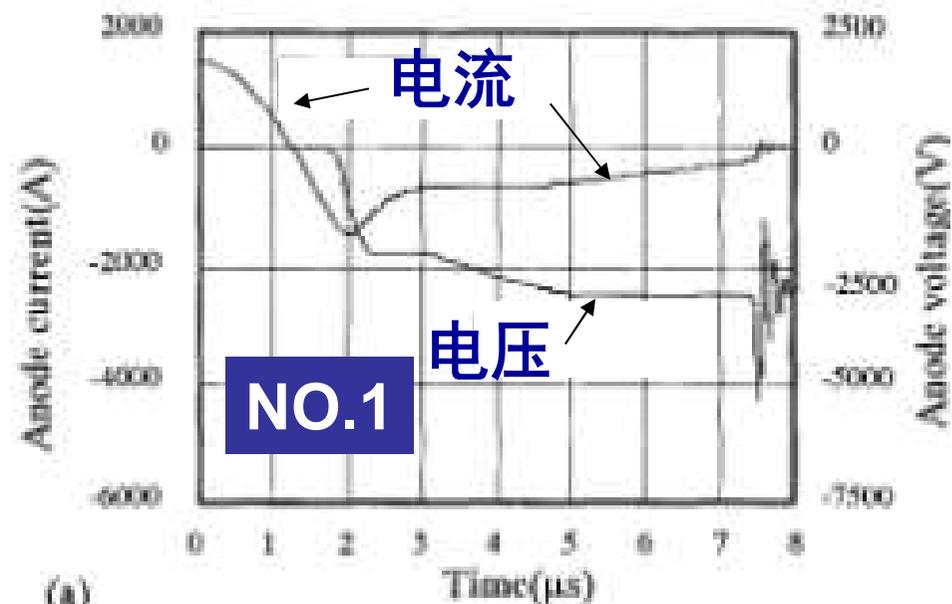
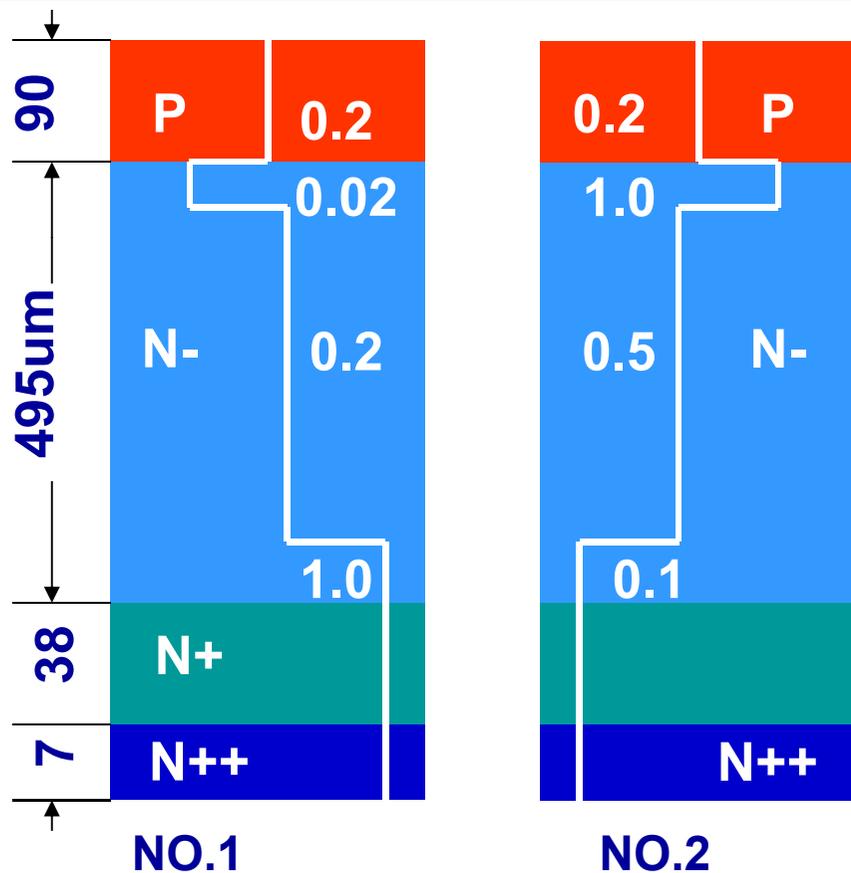
- 正向压降 小
- 反向恢复软度 大
- 反向恢复速度 快
- 反向恢复电流峰值 低

低载流子寿命区



轴向低寿命区D的位置

	$V_F(V)$	$I_{RM}(A)$	S
NO.1	2.7	1470	2.0
NO.2	3.4	2692	1.1



(2) 现有实现局域寿命控制的技术方法

- 氦离子注入
- 氢离子注入（有N型掺杂效应；缺陷产生效率较低）

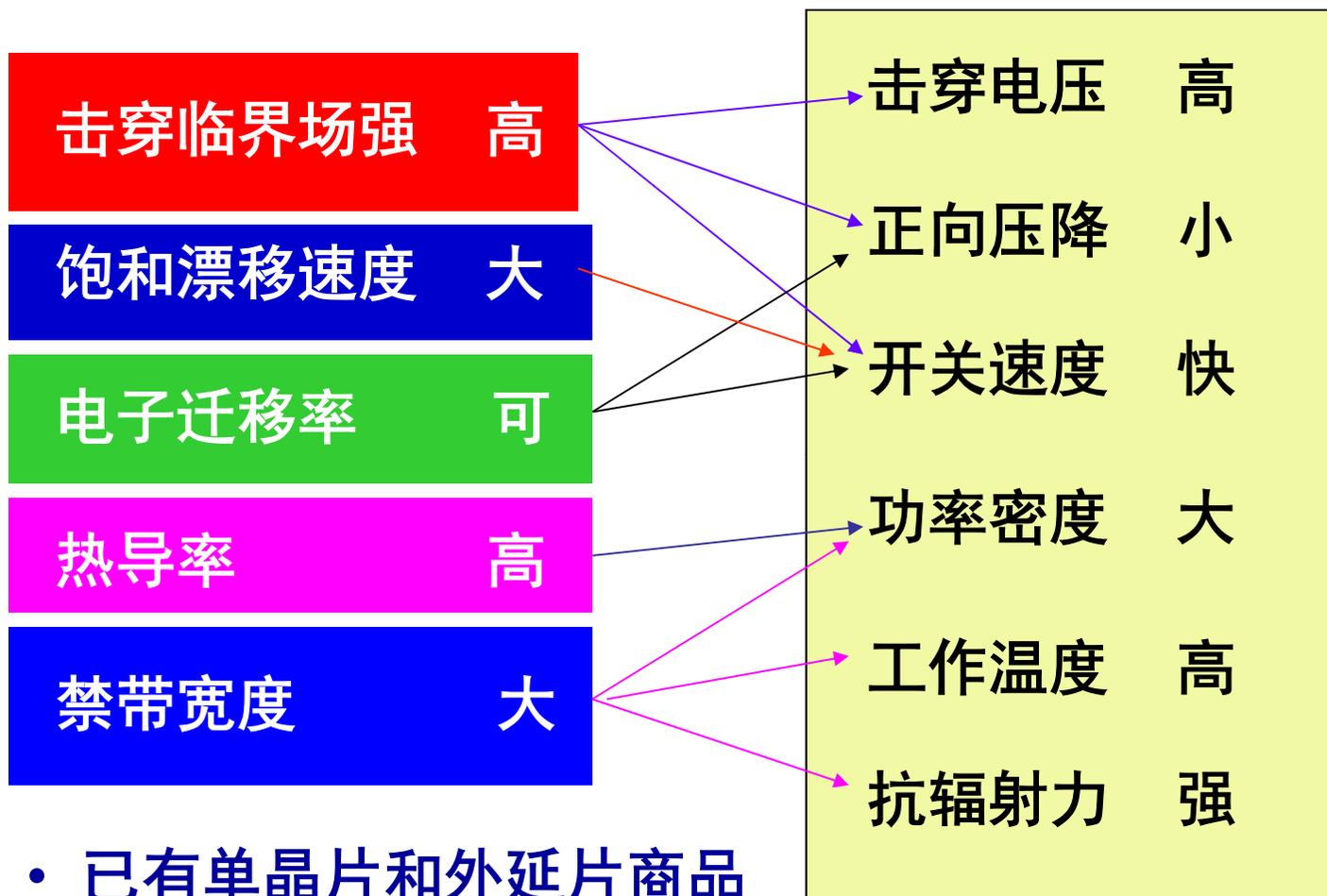
(3) 现有技术使用情况及存在问题

- 需要超高能量注入设备，不易普及；但是国外已经使用较多，例如欧洲SEMI LAB. 的CAL系列
北工大正研究注入缺陷转化为纳米空腔来解决
- 反向漏电流较大
北工大正研究轻离子注入缺陷提取铂来解决

六. 制造FRD用半导体材料的发展

半导体材料	Si	GaAs	4H SiC	6H SiC	GaN
禁带宽度 E_g (eV)	1.12	1.4	3.26	3	3.39
击穿临界场强 E_c (10^6 V/cm)	0.3	0.4	3.0	2.0	3.3
电子迁移率 μ_n ($\text{cm}^2 \cdot \text{V} \cdot \text{s}$)	1350	8500	980	370	900
介电常数 ϵ_r	11.8	12.8	9.8	9.7	9.0
热导率 λ (W/cm. K)	1.7	0.5	4.9	4.9	1.3
本征载流子浓度 n_i (cm^{-3})	1.5E10	1.8E6	8.2E-9	2.3E-6	1.9E-10
电子饱和漂移速度 v_s (10^7 cm/s)	1.0	2.0	2.0	2.0	2.5

新材料快恢复二极管的性能优越性



- 已有单晶片和外延片商品
- 已有PIN、SBD和JBS快恢复二极管商品

七. 二极管制造工艺平台的类别

第一类：深结台面工艺，单晶片，圆片或方片

- ◆ 工艺简单，生产条件要求低，单晶片成本
- ◆ 电参数优化难（结太深），生产效率低

第二类：浅结平面工艺，精细光刻，离子注入

(1) 外延片（FRED）：本报告所涉及的基本都是(除以下几种)

(2) 区熔单晶片：晶片便宜，FCE, CIBH, FZ-Diode

- ◆ 工艺复杂，生产条件要求高，外延片成本高
- ◆ 电参数高度优化，生产效率很高

国内：基本是第一类，罕见第二类

国外：基本是第二类，少数保留为第一类

八. 结束语

功率快恢复二极管：

1, 地位重要, 用量大

2, 技术难点多, 制造难度大

恢复快 \longleftrightarrow 恢复软

耐高压 \longleftrightarrow 压降低

正温度系数 \longleftrightarrow 压降低

没有全面都好的二极管, 不同产品对不同用途, 品种很多

3, 国内重视还不够, 外延平面制造技术几乎未用, 占主流的高档产品不能做, 目前利润空间大

谢谢!