

# 第六章 新型半导体器件

§6.1 存储器

§6.2 薄膜晶体管与显示驱动

§6.3 功率电子器件

§6.4 光电器件

## §6.3 功率电子器件

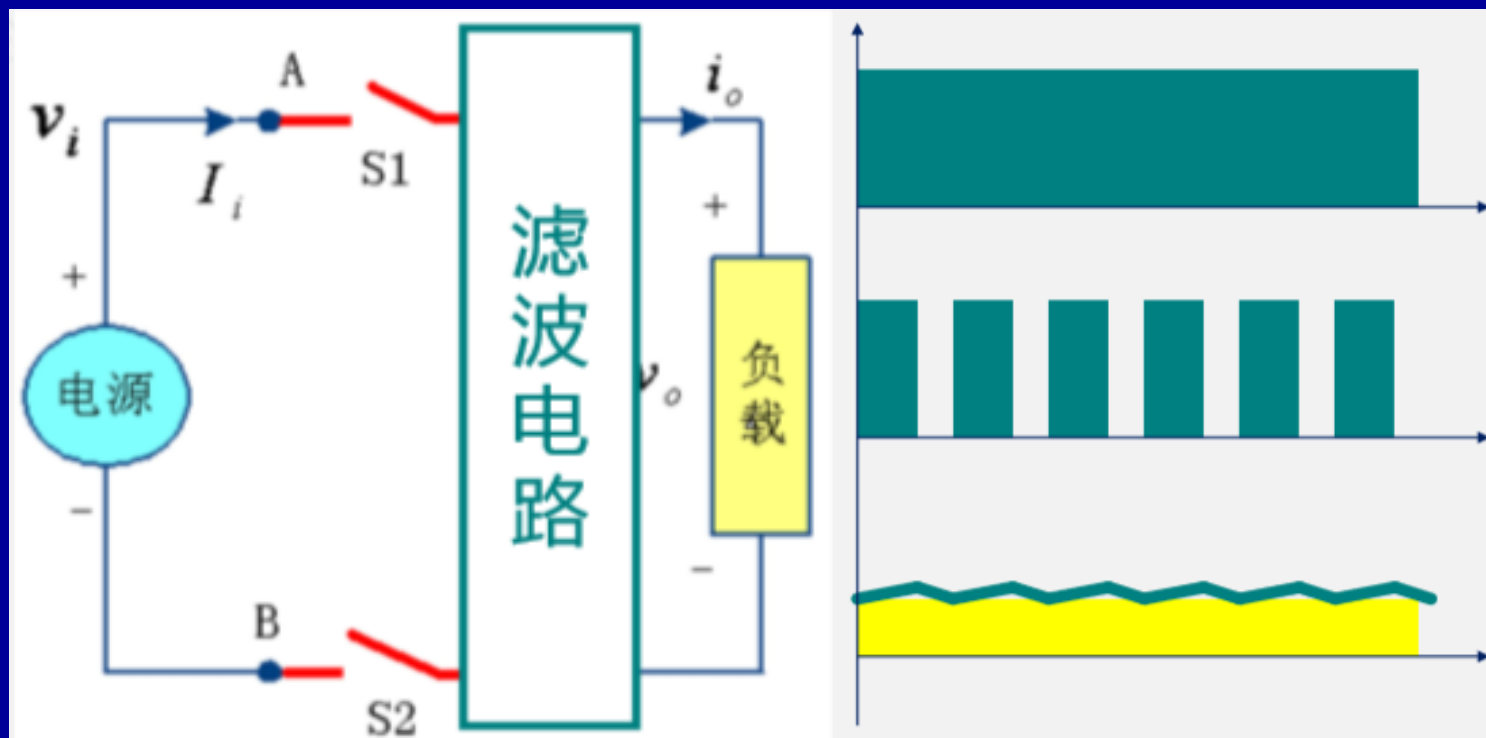
- ◆ **功率器件**：用于控制高功率电路或者放大小交流信号为高功率交流信号的电子器件，其必须可以承受高电压和大电流
- ◆ 与常规半导体器件不同的地方在于应用环境不同，使得半导体器件的击穿问题变成了需要首要考虑的问题
- ◆ 功率电子器件能正常工作在多大的功率下主要取决于半导体器件**击穿原理**

# 应用场景

- ◆电力的控制及变换，小功率控制大功率
- ◆微小交流信号的放大

# 电力控制及变换

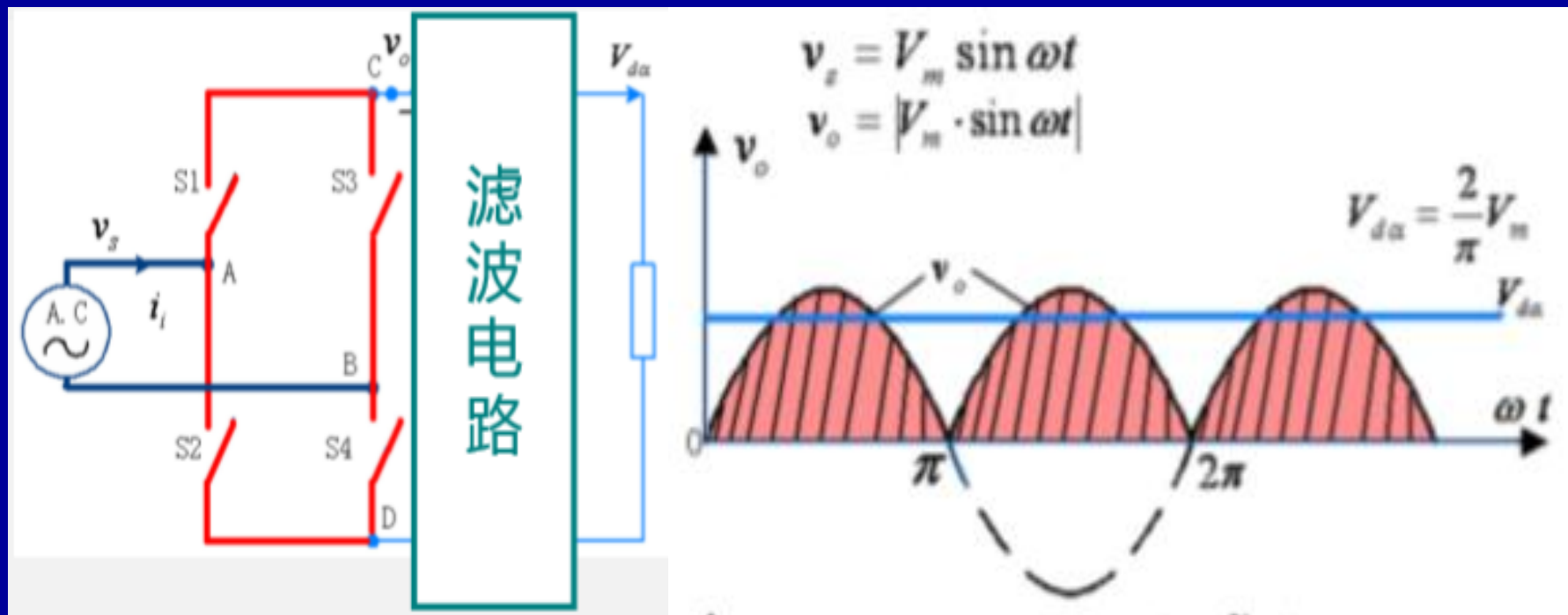
## ◆DC-DC



- ◆通过功率器件作为开关。
- ◆以一定的频率控制功率器件开启和关断从而实现控制输出到负载上电功率的大小

# 电力控制及变换

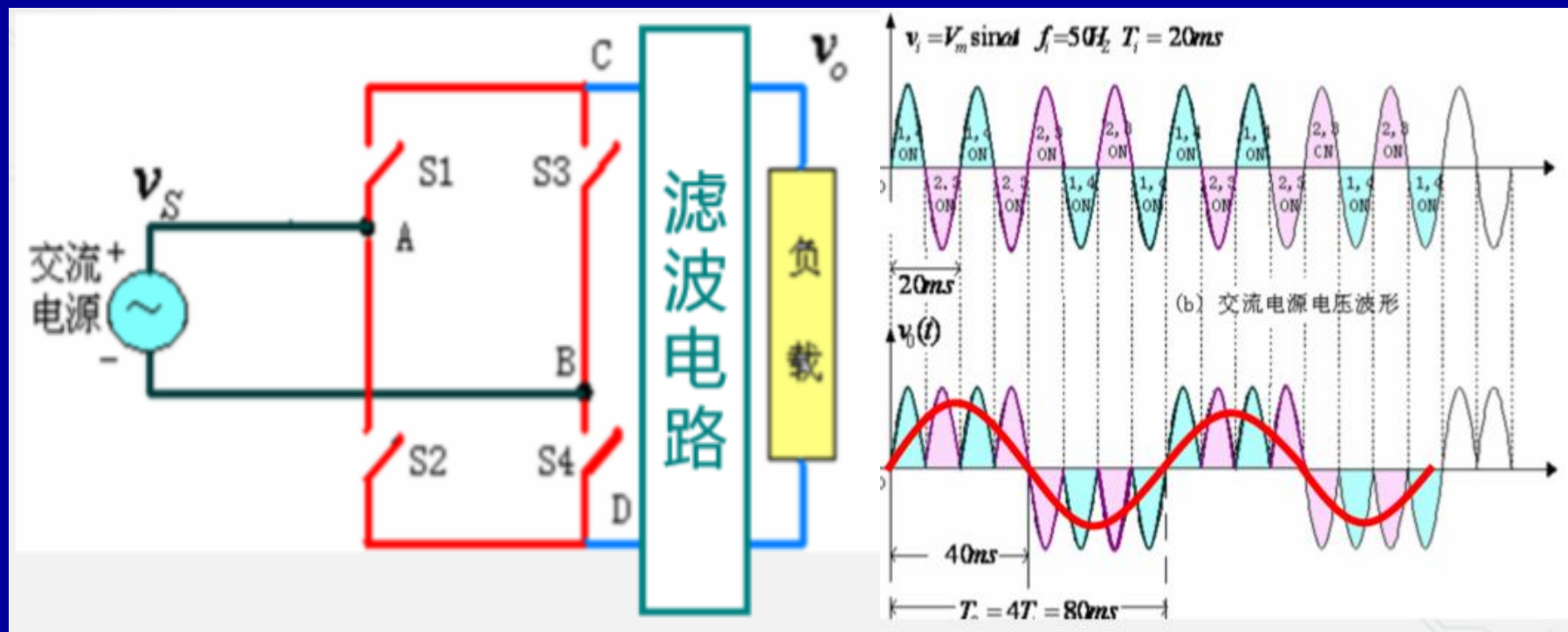
## ◆AC-DC



◆通过一个由功率器件组成的全桥整流电路改变电流的方向从而实现交流向直流的转变

# 电力控制及变换

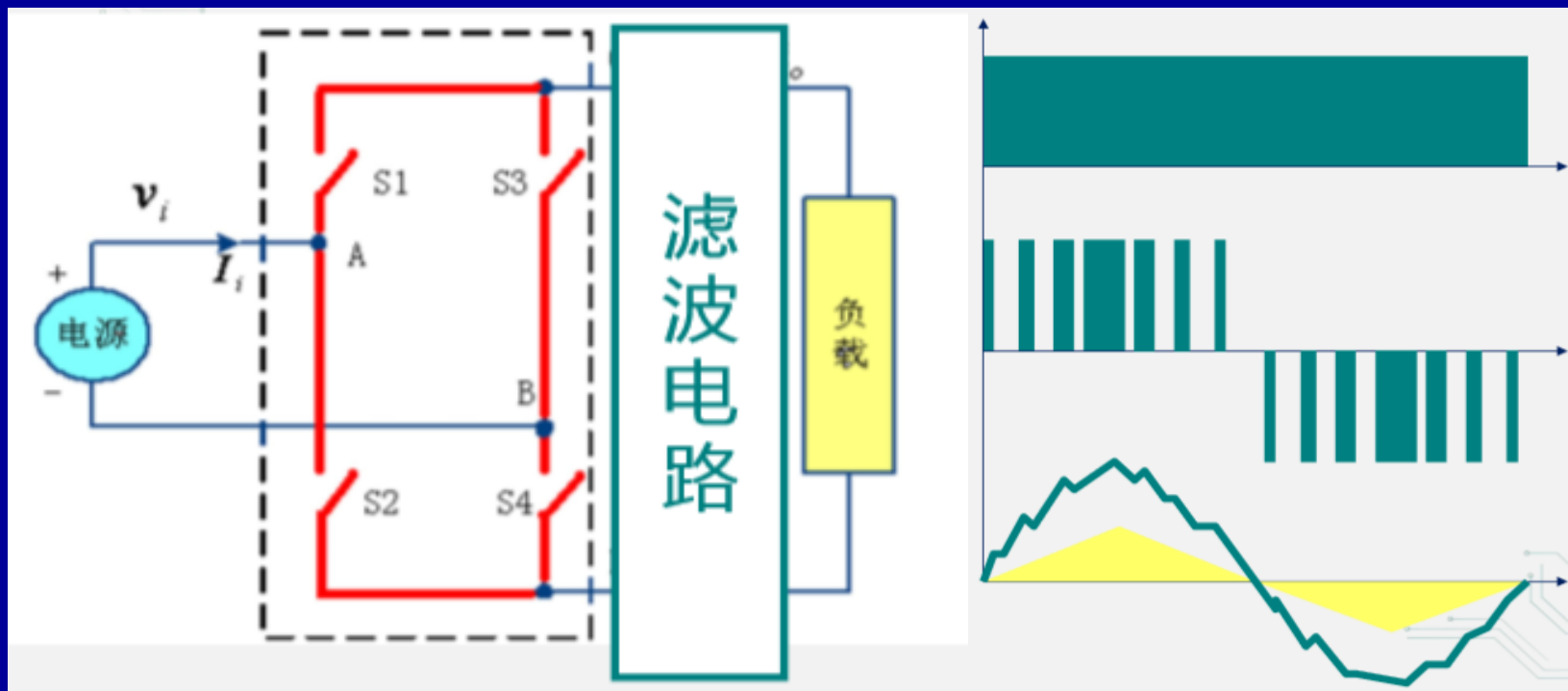
## ◆AC-AC



- ◆ 通过一个由功率器件组成的全桥整流电路改变电流的方向
- ◆ 不同时间段整流方向不同，从而产生新频率的交流信号

# 电力控制及变换

## ◆DC-AC



- ◆ 以特定的节奏控制功率器件的开启和关断
- ◆ 同时通过一个由功率器件组成的全桥整流电路改变电流的方向从而实现直流向交流的转变

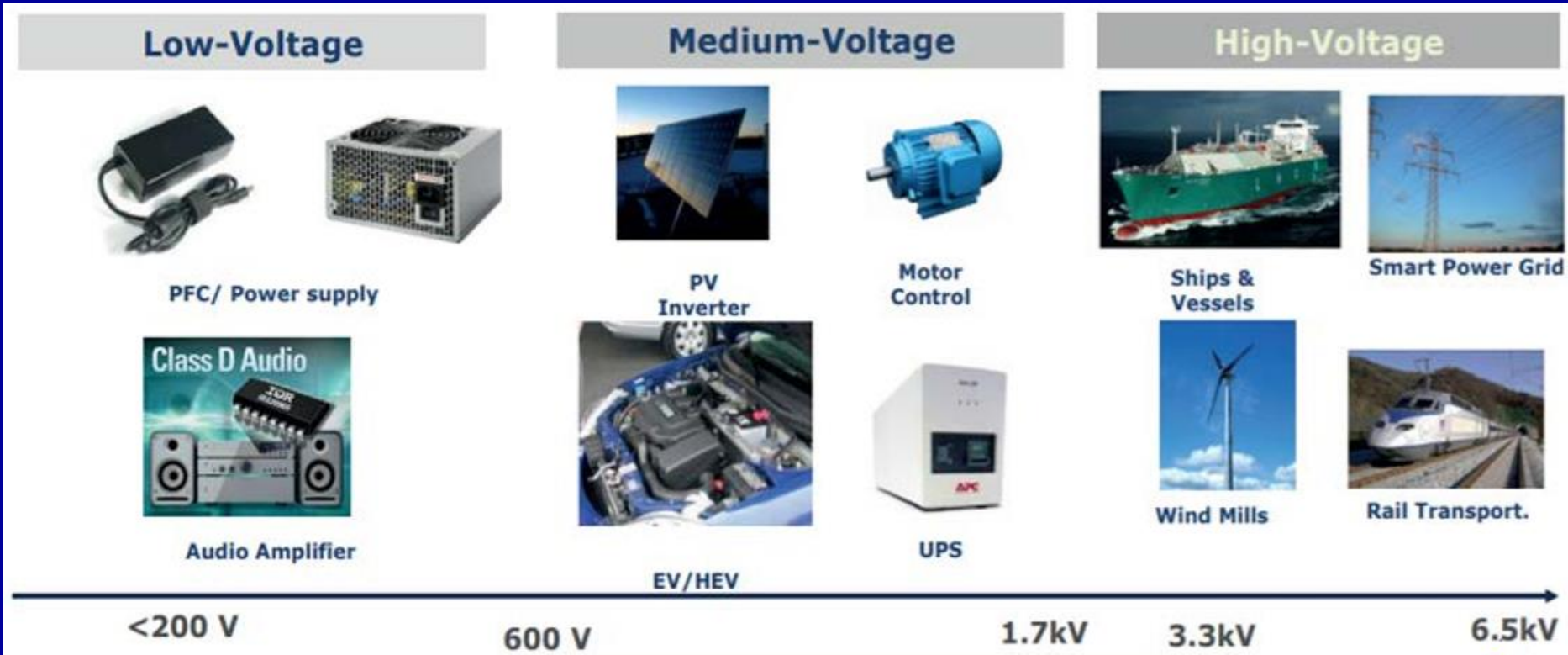
# 电力控制及变换





# 电力控制及变换

## ◆民用领域



- ◆ 涵盖了大型基础设施建设领域如电网，高铁等
- ◆ 涵盖了普通消费电子领域，如快速充电，新能源汽车等

# 电力控制及变换

## ◆军事领域

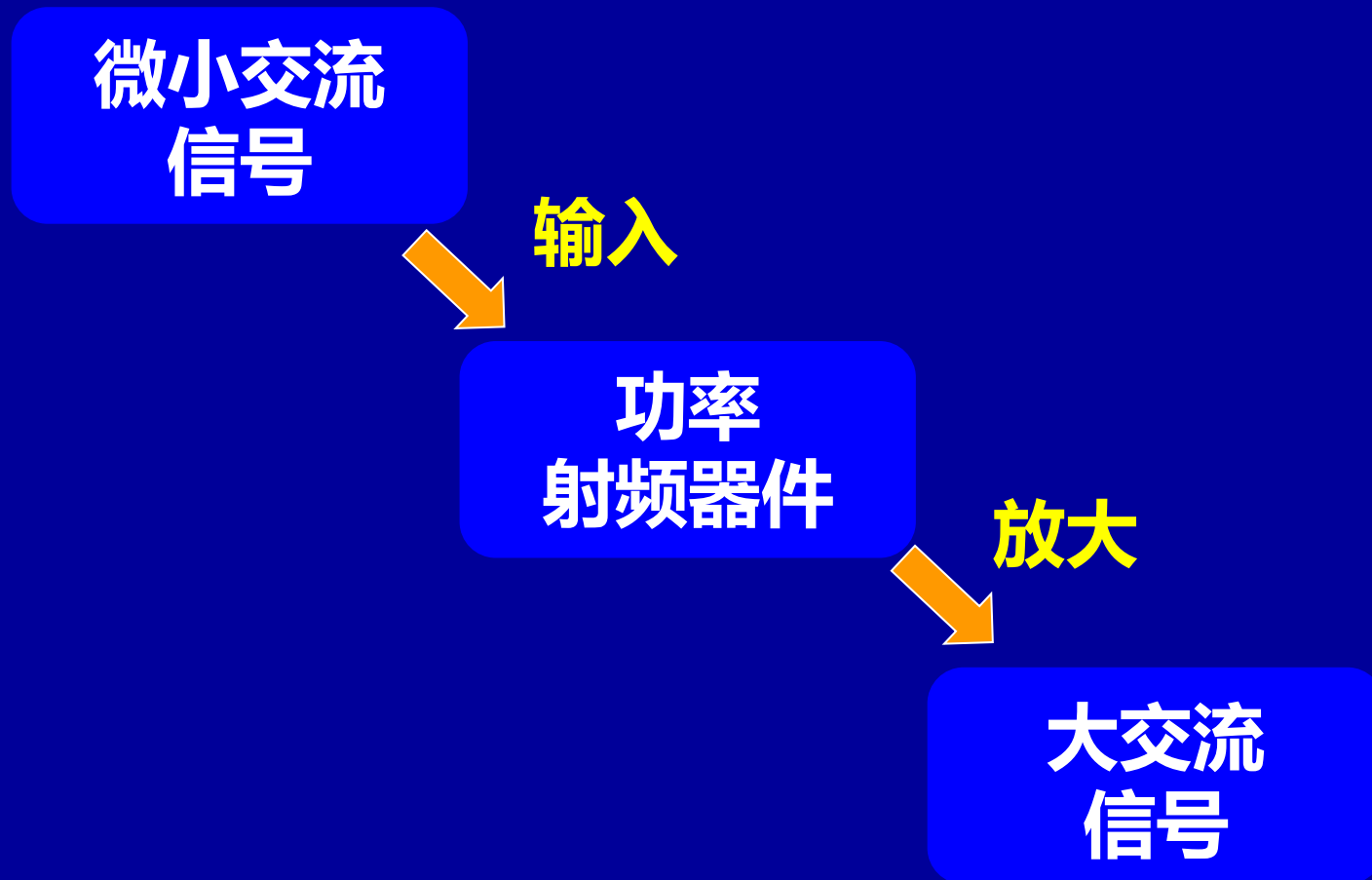


美国米利诺基特号上的32MJ电磁轨道炮



战斗机电磁弹射起飞

# 交流信号放大



# 交流信号放大

◆通信领域

◆举例：GaN HEMT—用于5G 基站射频功率放大



# 击穿原理回顾

# 半导体器件击穿原理

- ◆ **雪崩击穿**：反偏电压下穿越空间电荷区的空穴和电子与耗尽区内的原子碰撞发生剧烈的雪崩效应引起的击穿

$$\text{突变结: } V_B = 60 \left( \frac{E_g}{1.1} \right)^{\frac{3}{2}} \left( \frac{N_B}{10^{16}} \right)^{-\frac{3}{4}}$$

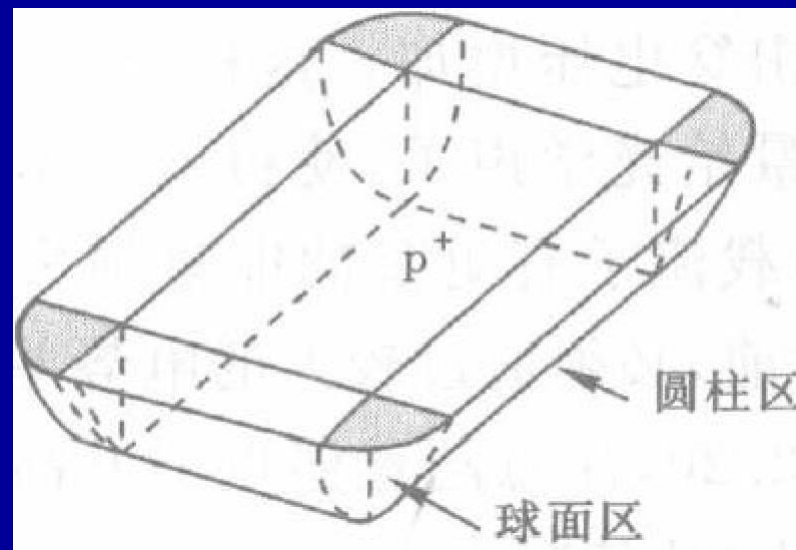
$$\text{缓变结: } V_B = 60 \left( \frac{E_g}{1.1} \right)^{\frac{6}{5}} \left[ \frac{a}{(3 \times 10^{20})} \right]^{-\frac{2}{5}}$$

- ◆ 理论击穿电压主要与材料 $E_g$ 和 $N_B$ 相关
- ◆ 早期较为成熟的半导体材料仅有硅，仅能通过改变 $N_B$ 提高击穿
- ◆ 新的宽禁带半导体材料如SiC, GaN和Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等的发展，新的功率器件通过增加 $E_g$ 提高击穿电压

# 半导体器件击穿原理

## ◆边缘效应

- ◆耗尽区边界弯曲越严重（曲率半径越小），边缘处的柱面结球面结的实际电场强度越大，击穿更容易发生。



$$\frac{E_{C,CYL}}{E_{C,PP}} = \left( \frac{3 W_{PP}}{4 r_J} \right)^{1/7}$$

$$\frac{E_{C,SP}}{E_{C,PP}} = \left( \frac{13 W_{PP}}{8 r_J} \right)^{1/7}$$

CYL: 柱面结

PP: 平面结

SP: 球面结

$r_j$ : 结曲率半径

- ◆ 引入新器件结构，增大曲率半径，提升击穿性能

# 器件结构





# 功率PN结二极管

## ◆简单PN结构：

- ◆特点：漏电流小，通态压降高（1.0-1.8V），反向恢复时间长（ $\mu\text{s}$ ），可以承受很高的电流及较高的电压。多用于对器件工作速度不高的装置中。

## ◆PIN结构：

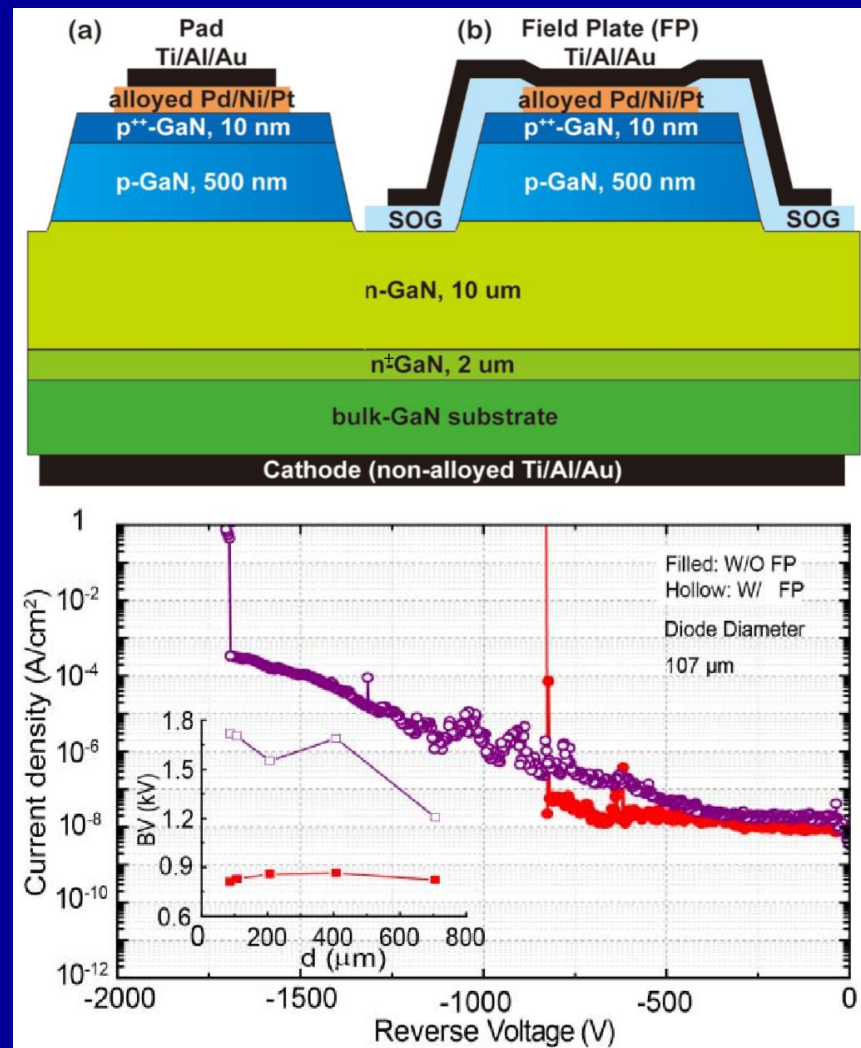
- ◆特点：漏电流小，通态压降很高（1.6-4.0V），具有较快的反向恢复时间（ $\text{ns}$ ），能承受很高的电压和较大的电流。主要用于斩波等电路中。

# 实际PIN二极管器件

◆ (a) 简单PIN结构

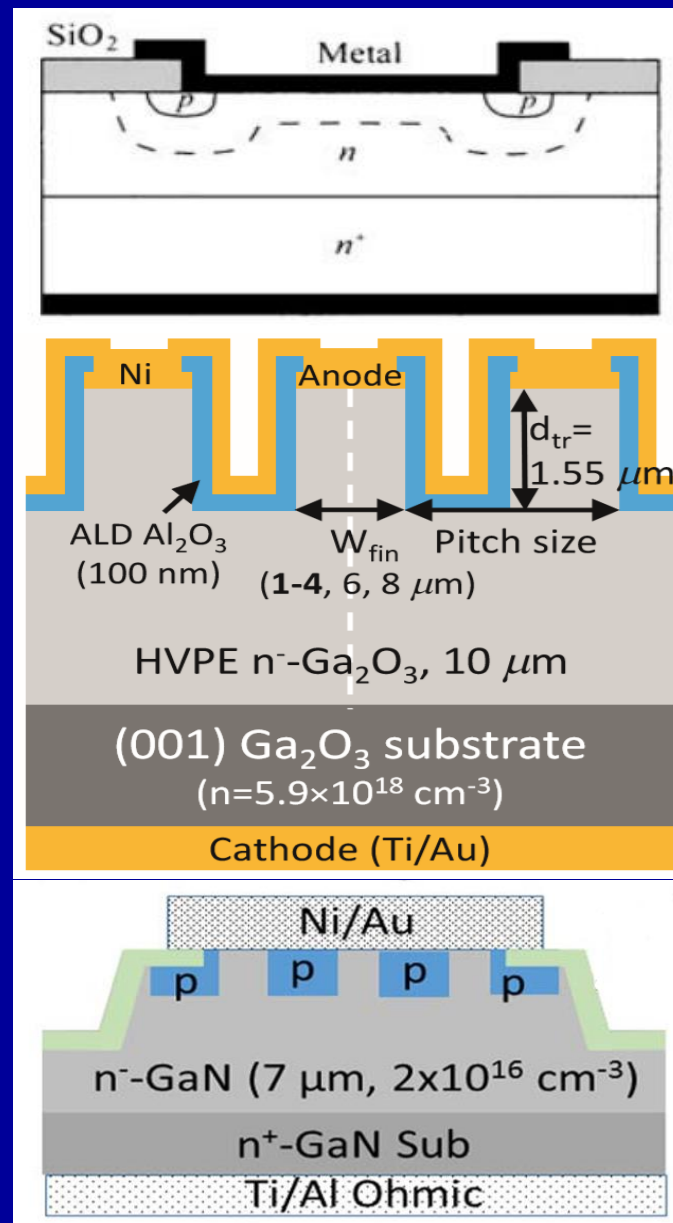
◆ (b) 场板PIN结构

◆ 场板结构显著提升了器件的击穿电压



# SBD器件

- ◆ **特点**：具有几乎为零的反向恢复时间和低的通态压降（0.3-0.6V），但是漏电流大，耐压能力低。通常用于高频低压装置中
- ◆ SBD器件漏电流大的缺点将造成极大的浪费，为解决此问题提出了**Trench MOS Barrier Schottky (TMBS)** 结构的新型SBD器件
- ◆ SBD器件与PIN器件特点相互对立，若设法将两者优缺点互补，取长补短则可以得到综合性能优异的全能器件，即**Merged PIN/Schottky (MPS)** 器件

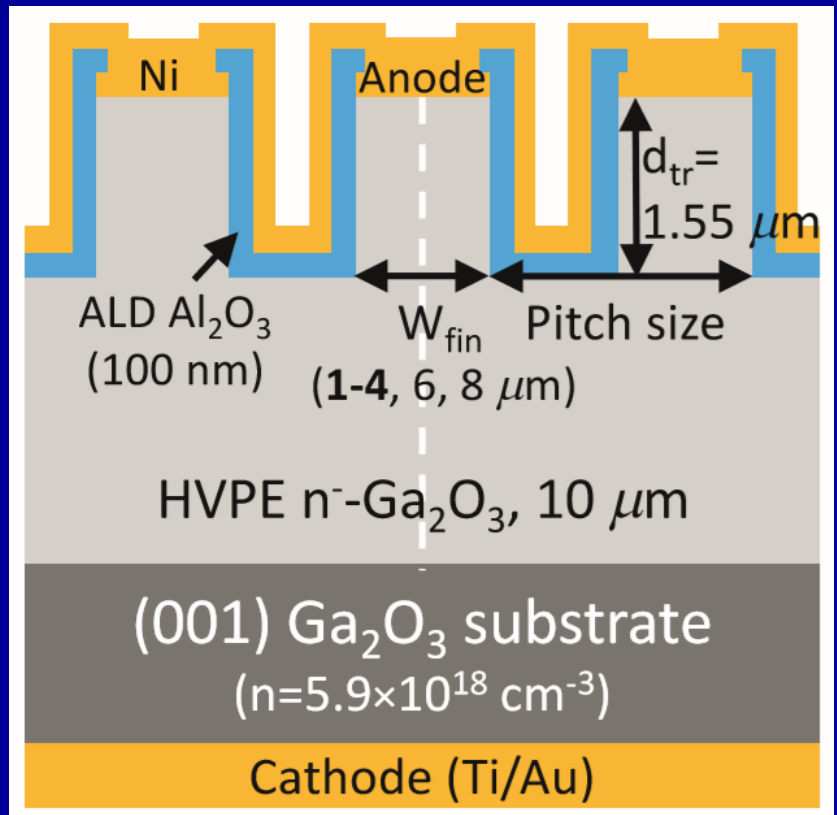


# TMBS器件

- ◆ Trench MOS Barrier Schottky (TMBS)
- ◆ 刻蚀出大量沟槽，并在沟槽侧壁设计MOS结构

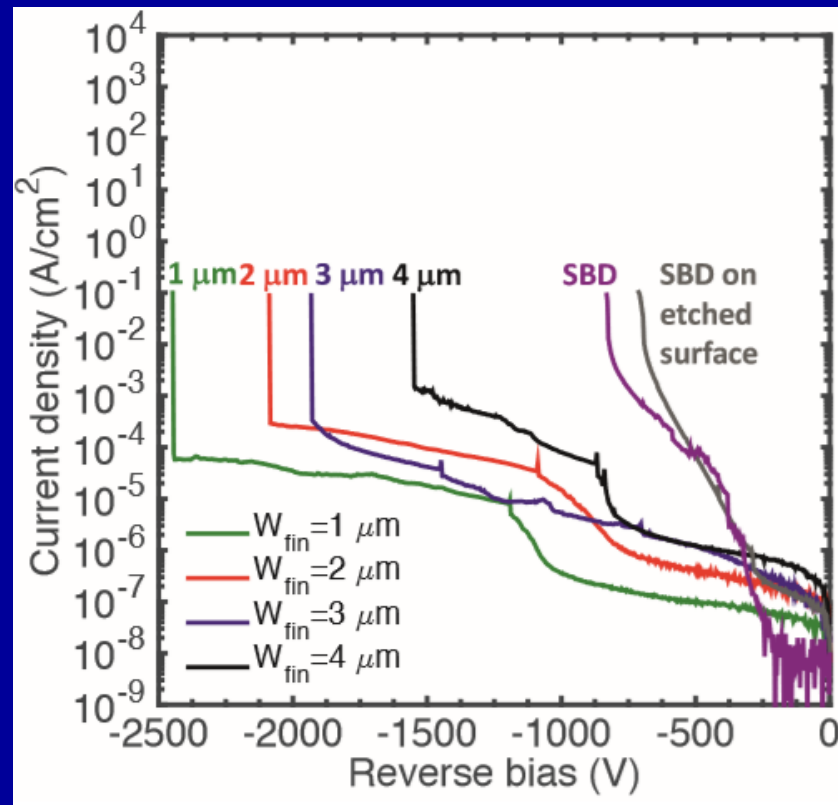
## 工作原理：

- ◆ 正向偏压下，电流通过肖特基结传输，导通压降低
- ◆ 反向偏压下，MOS结构将会对材料有耗尽作用使得器件耗尽区展宽。更宽的耗尽区将更好的阻挡漏电流，更宽的耗尽区可以耐受更高的电压，因此具有低漏电流高击穿电压的优势



# TMBS器件

- ◆ Trench MOS Barrier Schottky (TMBS)
- ◆ TMBS器件漏电流更低, 击穿电压更高



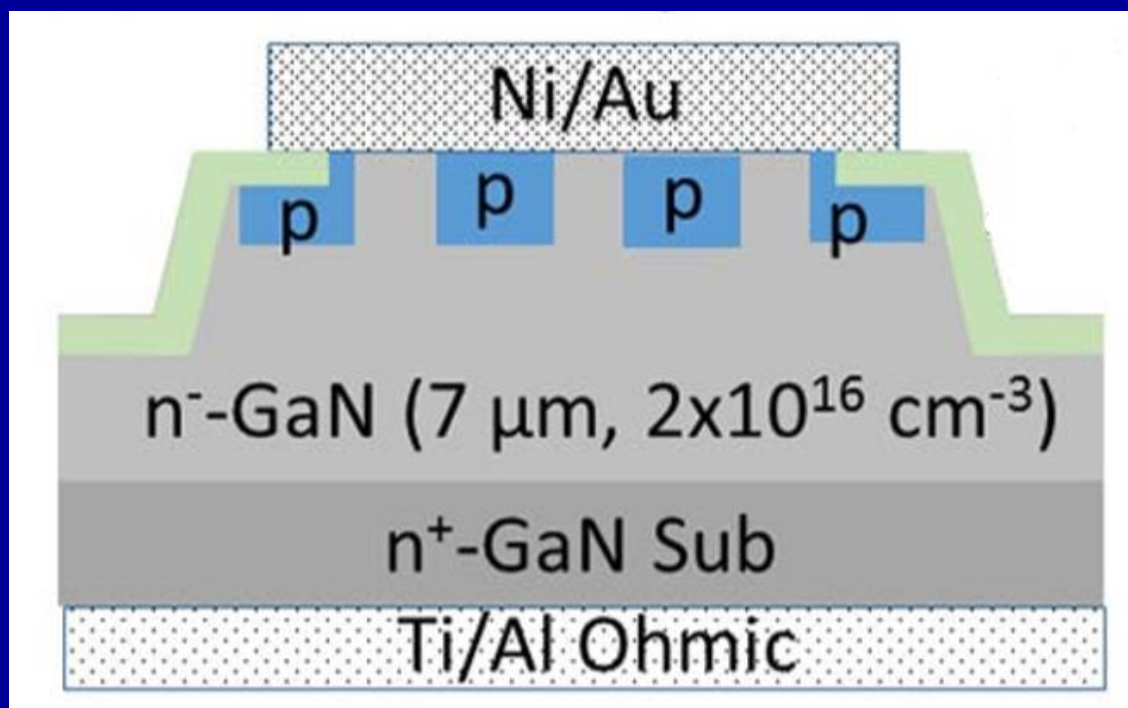
W. Li, Z. Hu, K. Nomoto, R. Jinno, Z. Zhang, T. Q. Tu, K. Sasaki, A. Kuramata, D. Jena, H. G. Xing, "2.44 kV Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vertical trench Schottky barrier diodes with very low reverse leakage current", presented at 2018 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 1-5 Dec. 2018, 2018

# MPS器件

- ◆MPS也称JBS (Junction Barrier Schottky)
- ◆在肖特基电极下方局部区域实现P型掺杂

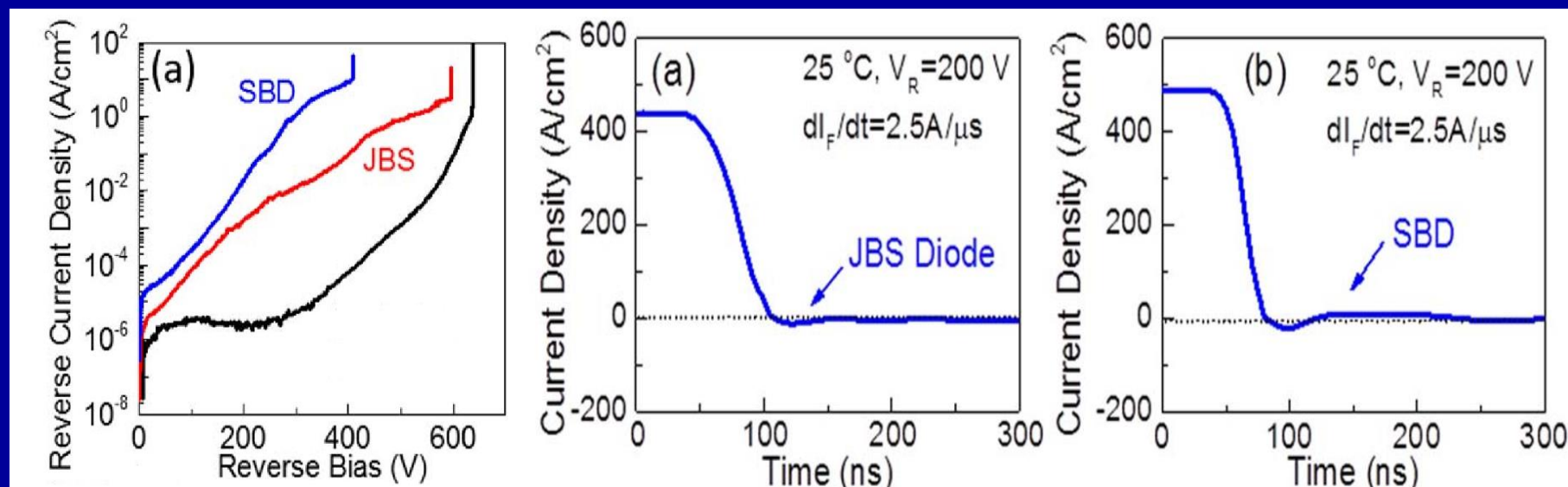
## 工作原理:

- ◆ 正向偏压下，电流主要通过肖特基结传输，因此具有低导通压降的优势，同时也减少了PN结中的少子存储，因此具有快的反向恢复时间
- ◆ 反向偏压下，PN结的额外耗尽作用使得器件耗尽区展宽，因此具有高反向耐压低漏电流的优势



# MPS器件

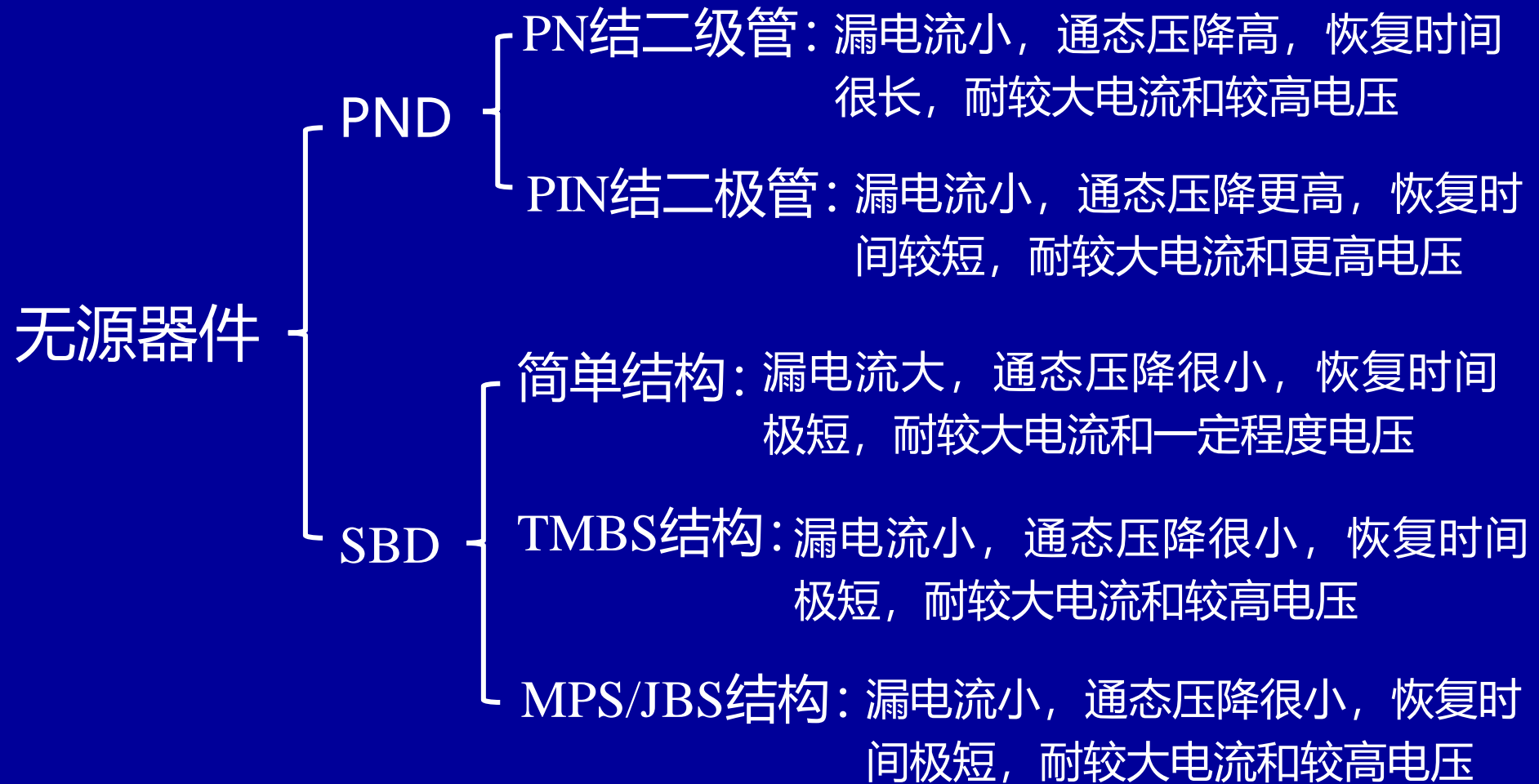
## ◆ Junction Barrier Schottky (MPS)



- ◆ JBS/MPS器件相较于SBD具有更低的漏电更高的击穿电压
- ◆ JBS/MPS器件相较于PND器件具有更快的反向恢复速度



# 无源器件总结

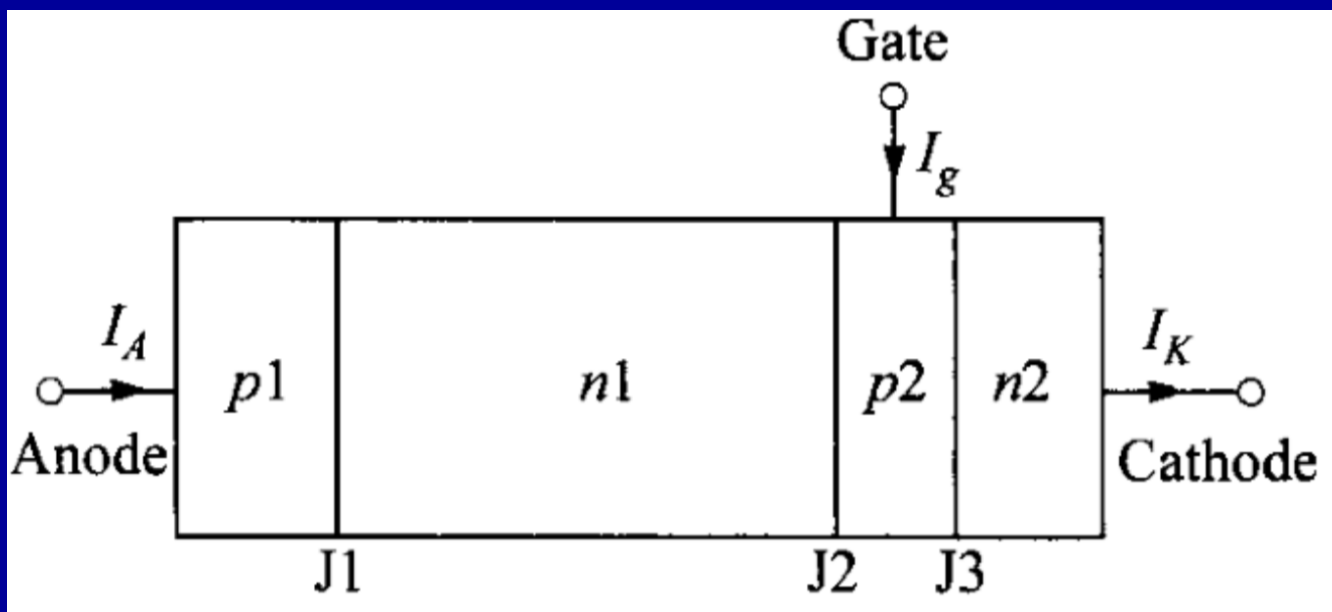




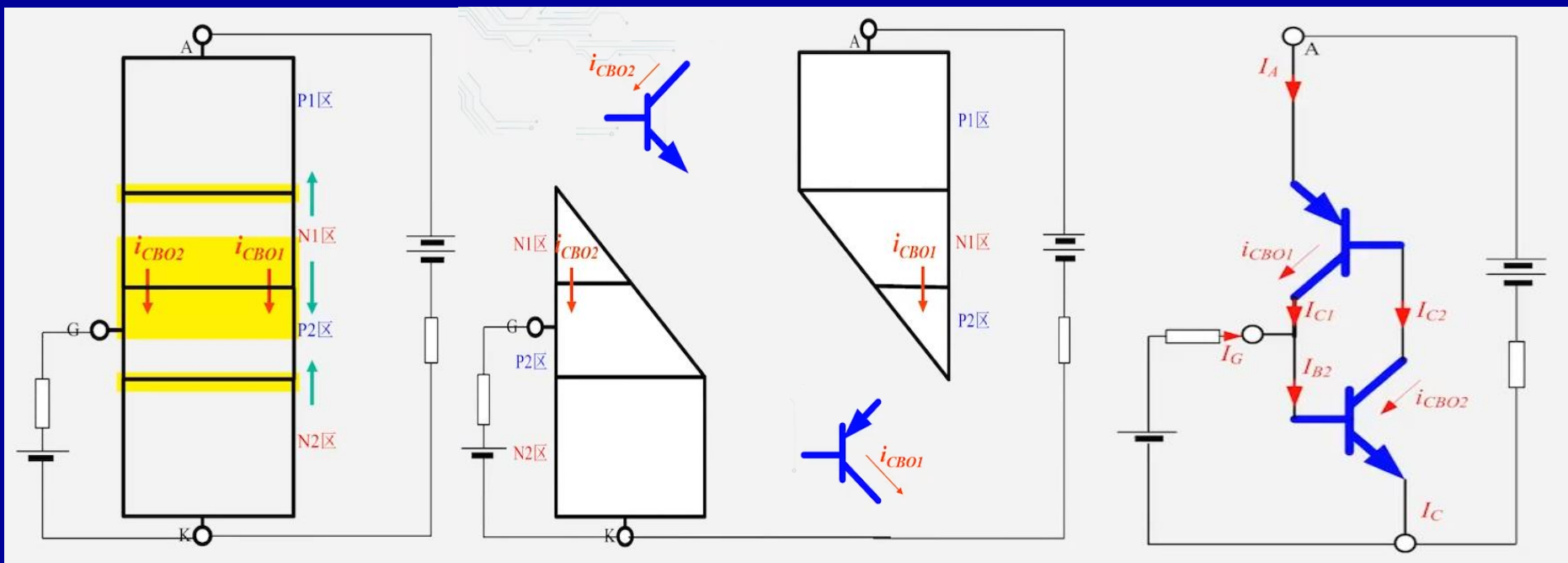
# 晶闸管器件

◆**晶闸管**：由3个串联的PN结构成的半控型器件

◆**特点**：半控型器件，元件导通后控制极将会失去作用，即可以控制开启，不能控制关断。



# 晶闸管工作原理



**工作原理：** 根据晶闸管的等效电路图分析

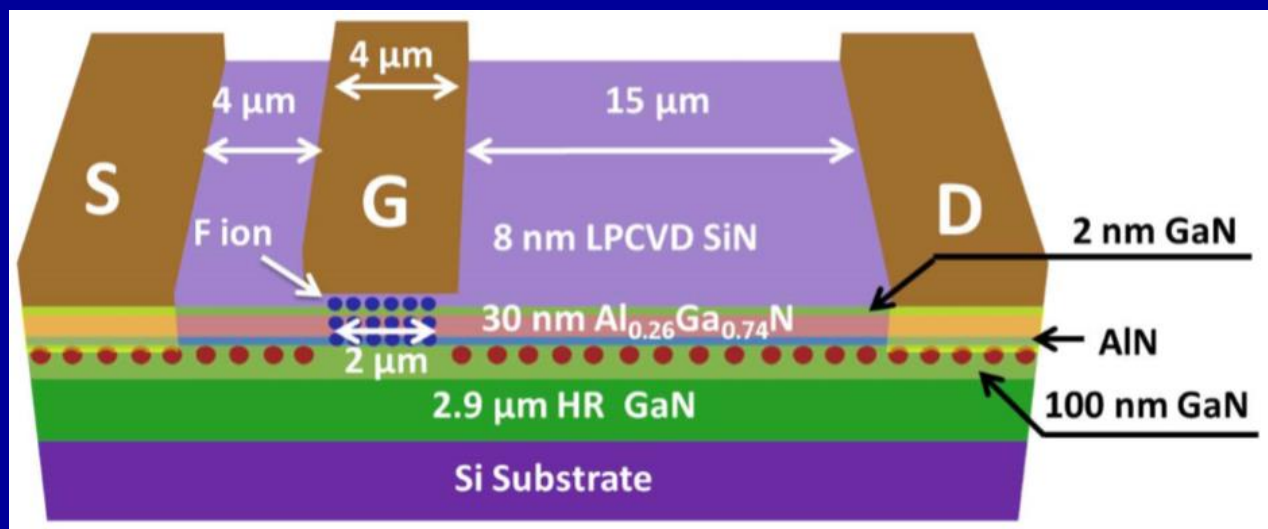
- ◆ 控制电路提供 $I_G$ ，导致晶体管2导通， $I_{C2}$ 增加
- ◆  $I_{C2}$ 为晶体管1基极电流，晶体管1导通， $I_{C1}$ 增加
- ◆  $I_{C1}$ 为晶体管2基极电流，晶体管2导通能力增强， $I_{C2}$ 再增加
- ◆ 两晶体管因此形成一个正反馈系统

# 晶闸管器件

- ◆晶闸管被称为第一代功率器件，但由于其半控性质，应用中存在很多的限制，特别是其只能用于电力控制与变换不能用于放大交流信号。
- ◆为实现全控型功率器件，逐渐出现了一些晶闸管的衍生物，如栅极可关断晶闸管（GTO），及功率双极型晶体管（Power BJT）
- ◆GTO和Power BJT虽然实现了全控，但是控制能力依旧不理想，因此控制能力更强的功率MOSFET器件出现

# 水平结构功率MOSFET

- ◆结构同普通MOSFET结构相同，区别在于功率MOSFET需要将栅漏距离增加，作为耐压的漂移区



- ◆水平结构MOSFET的优势
- ◆1、便于集成设计，可用于功率IC
- ◆2、可利用特殊的界面性质设计器件，如二维电子气

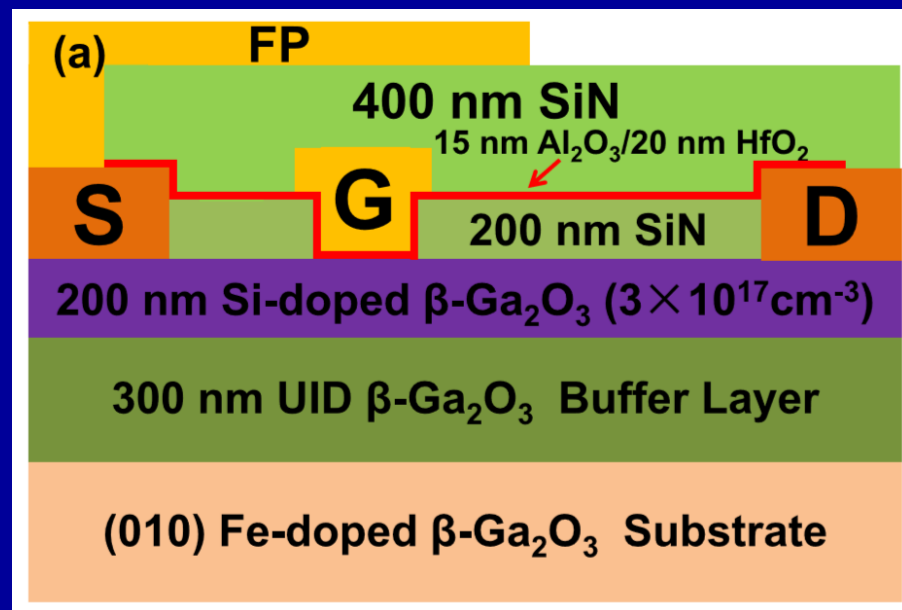
# 水平结构功率MOSFET

## ◆栅场板+源场板

- ◆ 栅场板降低了器件沟道电场强度，并将最大电场强度位置移动到栅场板边缘
- ◆ 源场板降低了栅场板边缘电场强度，并将最大电场强度位置移动到源场板边缘

## ◆双栅介质

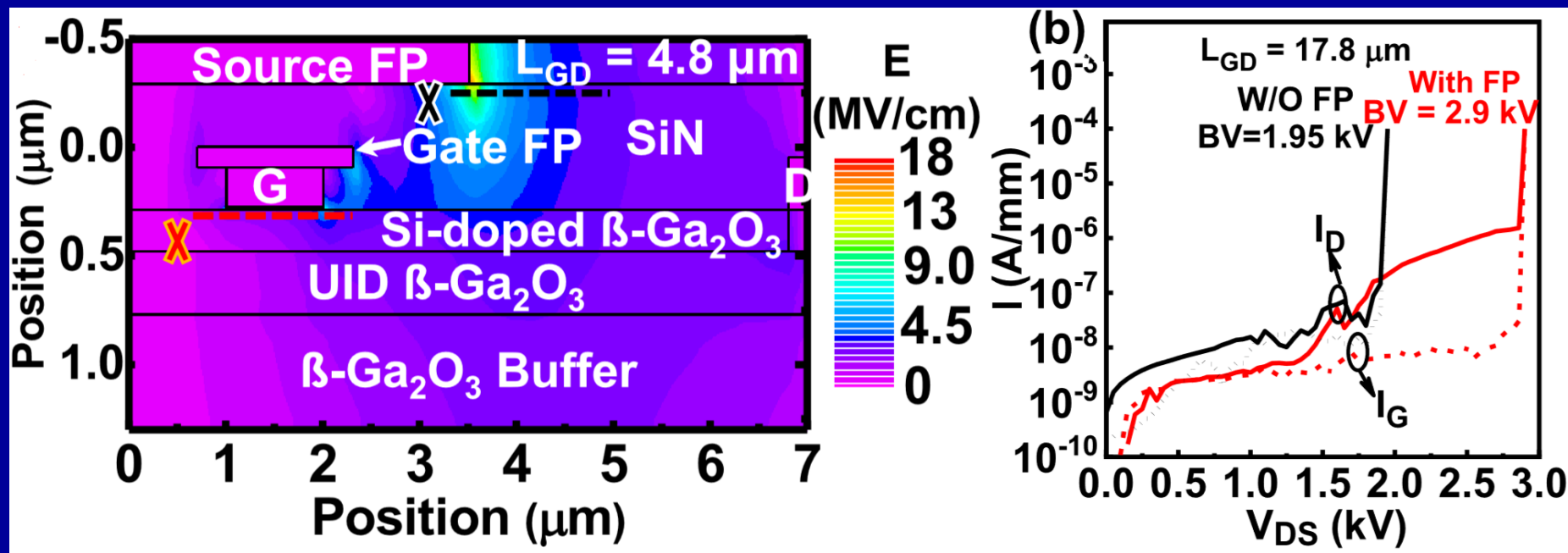
综合考虑介质材料的介电常数及电子阻挡能力，选择高介电常数的 $\text{HfO}_2$ 及强电子阻挡能力的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 做双介质层



Y. Lv, H. Liu, X. Zhou, Y. Wang, X. Song, Y. Cai, Q. Yan, C. Wang, S. Liang, J. Zhang, Z. Feng, H. Zhou, S. Cai, Y. Hao, *Lateral  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  MOSFETs With High Power Figure of Merit of 277 MW/cm<sup>2</sup>*, *IEEE Electron Device Letters* **2020**, 41, 537.

# 水平结构功率MOSFET

- ◆场板结构成功的降低电场强度峰值，并将其转移到更耐压的介质层中
- ◆场板器件击穿电压显著提高

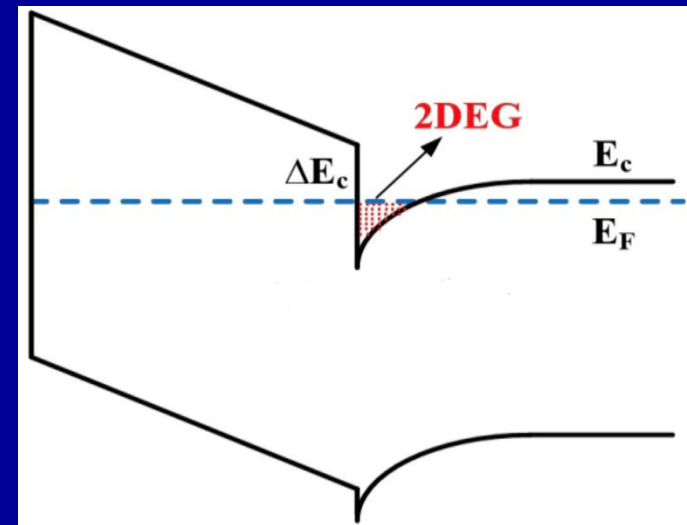


# HEMT器件

◆ **HEMT** (High Electron Mobility Transistor) , 高电子迁移率晶体管。一种异质结场效应晶体管, 又称为调制掺杂场效应晶体管 (MODFET)、二维电子气场效应晶体管 (2-DEGFET)

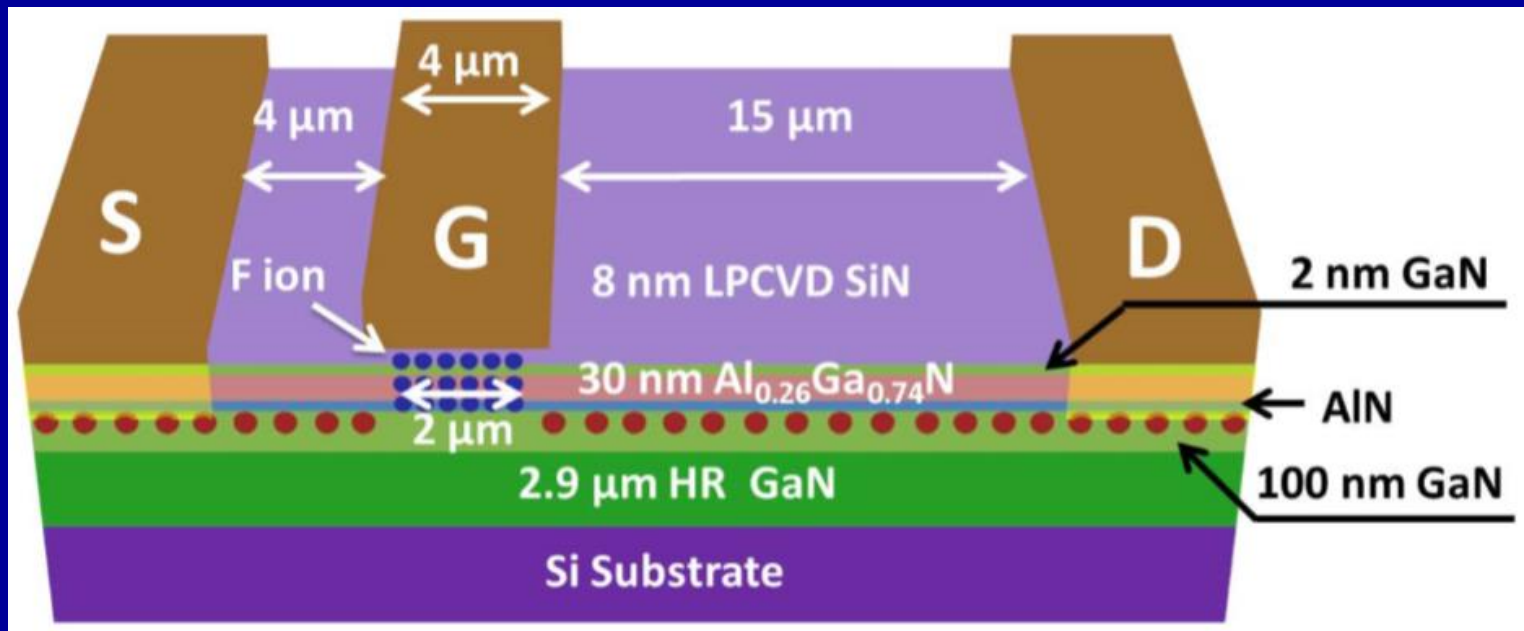
◆ 工作原理主要基于异质结界面形成的具有高电子迁移率及高电子浓度的薄层, 称为**二维电子气 (2DEG)**

◆ 高迁移率及高电子浓度意味着器件可以同时实现大电流及高速工作, 非常适合用于射频领域的功率放大



# 新材料HEMT器件

## ◆F离子注入实现增强型GaN HEMT 器件



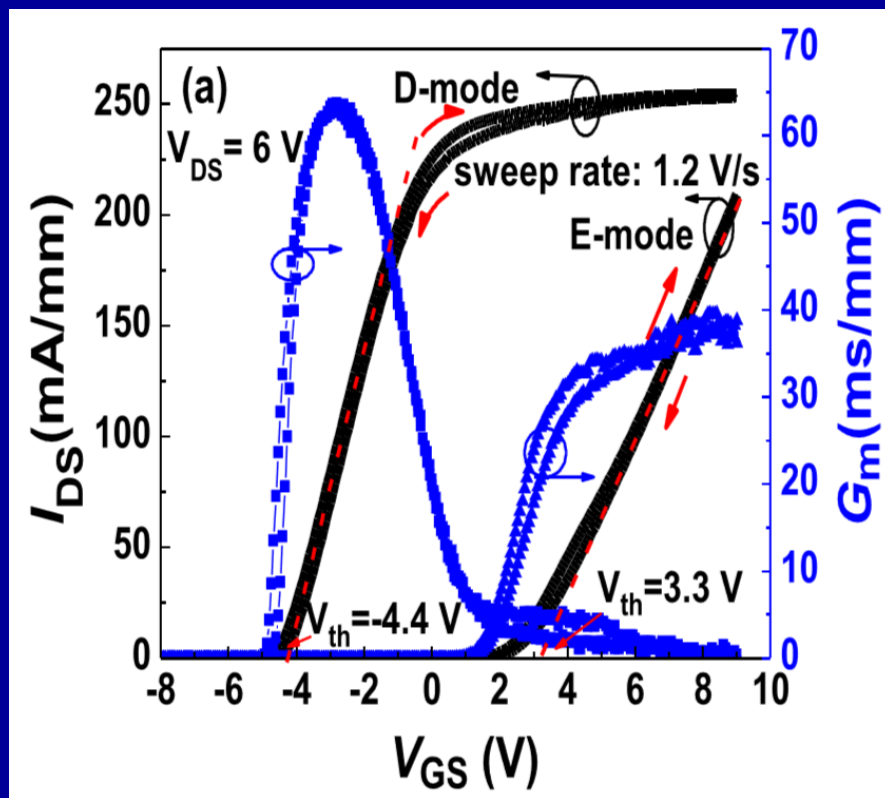
## ◆通过F离子注入到AlGaN势垒层内，导致栅极下方无法形成二维电子气，从而实现增强型性能

Z. Zhang, K. Fu, X. Deng, X. Zhang, Y. Fan, S. Sun, L. Song, Z. Xing, W. Huang, G. Yu, Y. Cai, B. Zhang, *Normally Off AlGaN/GaN MIS-High-Electron Mobility Transistors Fabricated by Using Low Pressure Chemical Vapor Deposition Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Gate Dielectric and Standard Fluorine Ion Implantation*, *IEEE Electron Device Letters* **2015**, 36, 1128.



# 新材料HEMT器件

- ◆ 由于高迁移率二维电子气的存在器件实现了极高的跨导
- ◆ 通过F离子注入成功实现了增强型 (E-Mode) HEMT 器件



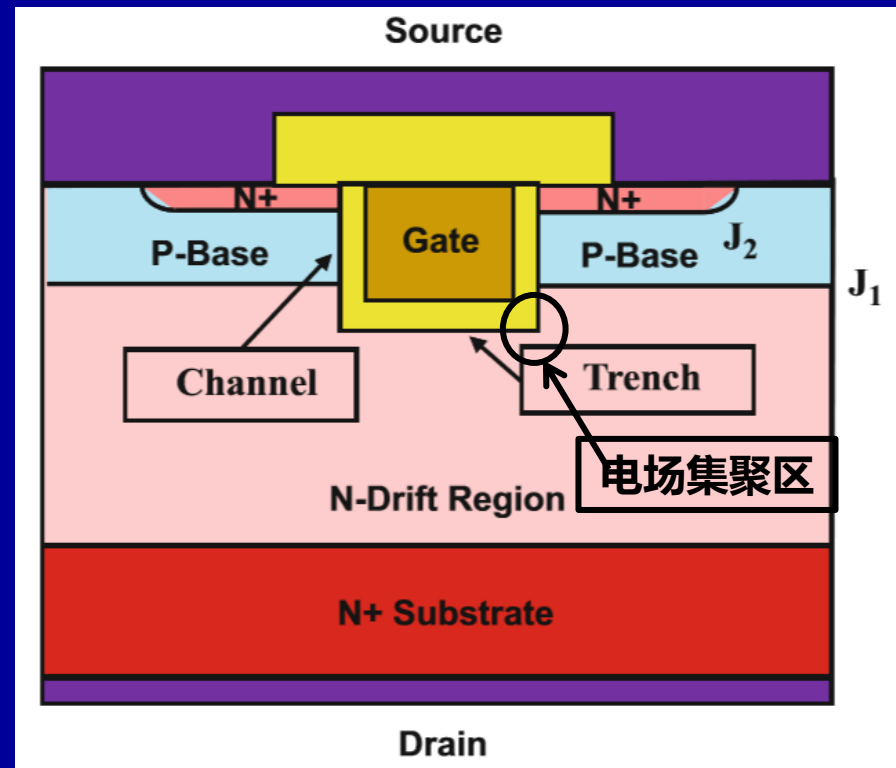
Z. Zhang, K. Fu, X. Deng, X. Zhang, Y. Fan, S. Sun, L. Song, Z. Xing, W. Huang, G. Yu, Y. Cai, B. Zhang, *Normally Off AlGaIn/GaN MIS-High-Electron Mobility Transistors Fabricated by Using Low Pressure Chemical Vapor Deposition Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Gate Dielectric and Standard Fluorine Ion Implantation*, *IEEE Electron Device Letters* **2015**, 36, 1128.

# 垂直结构MOSFET

## ◆ 水平结构器件有如下缺点：

- 1、单个器件面积大，制备成本高
- 2、大部分衬底材料仅起到支撑的作用
- 3、电流分布不均匀，容易发生局部电流堆积，造成破坏性热击穿

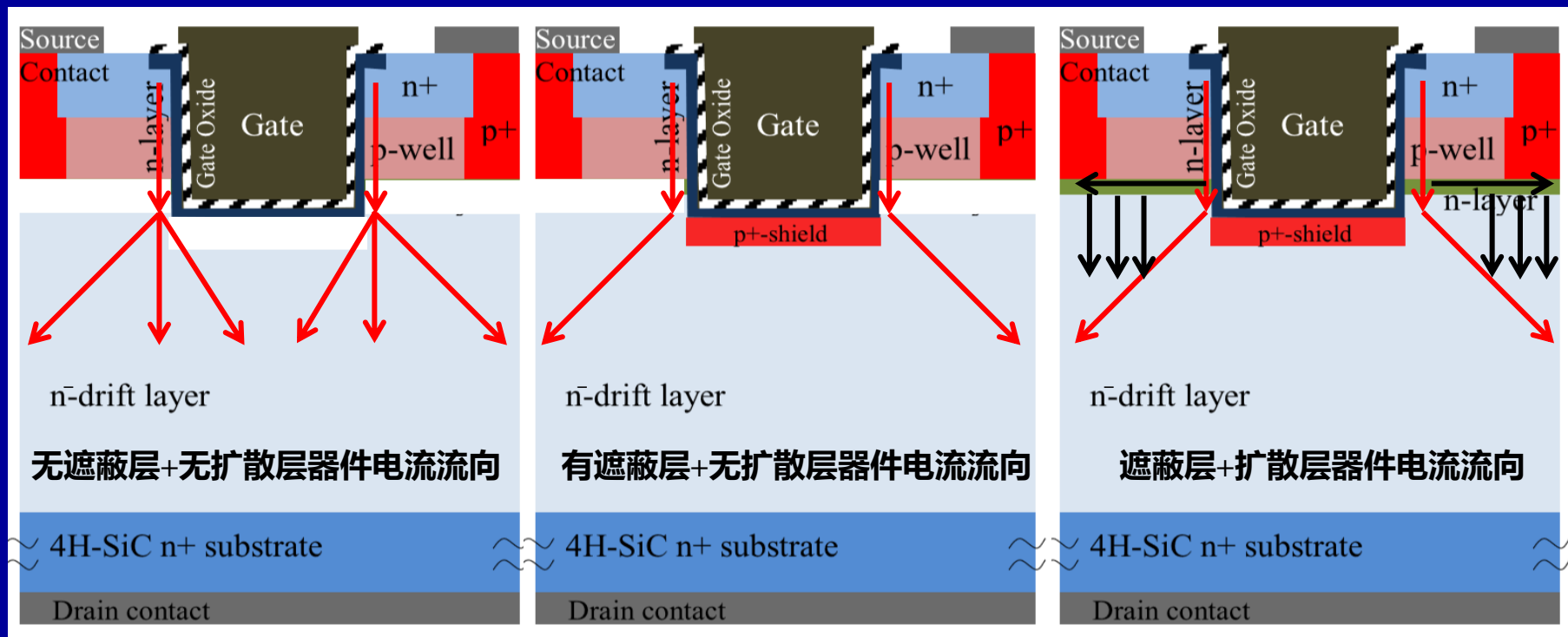
## ◆ 为解决上述问题出现了垂直结构功率 MOSFET，例如右图 UMOSFET



◆ 垂直结构MOSFET虽然不利于集成，但是功率器件通常具有很大的尺寸，通常作为分立器件使用，所以不利于集成对于垂直结构mosfet并无太大影响

# 垂直MOSFET器件优化

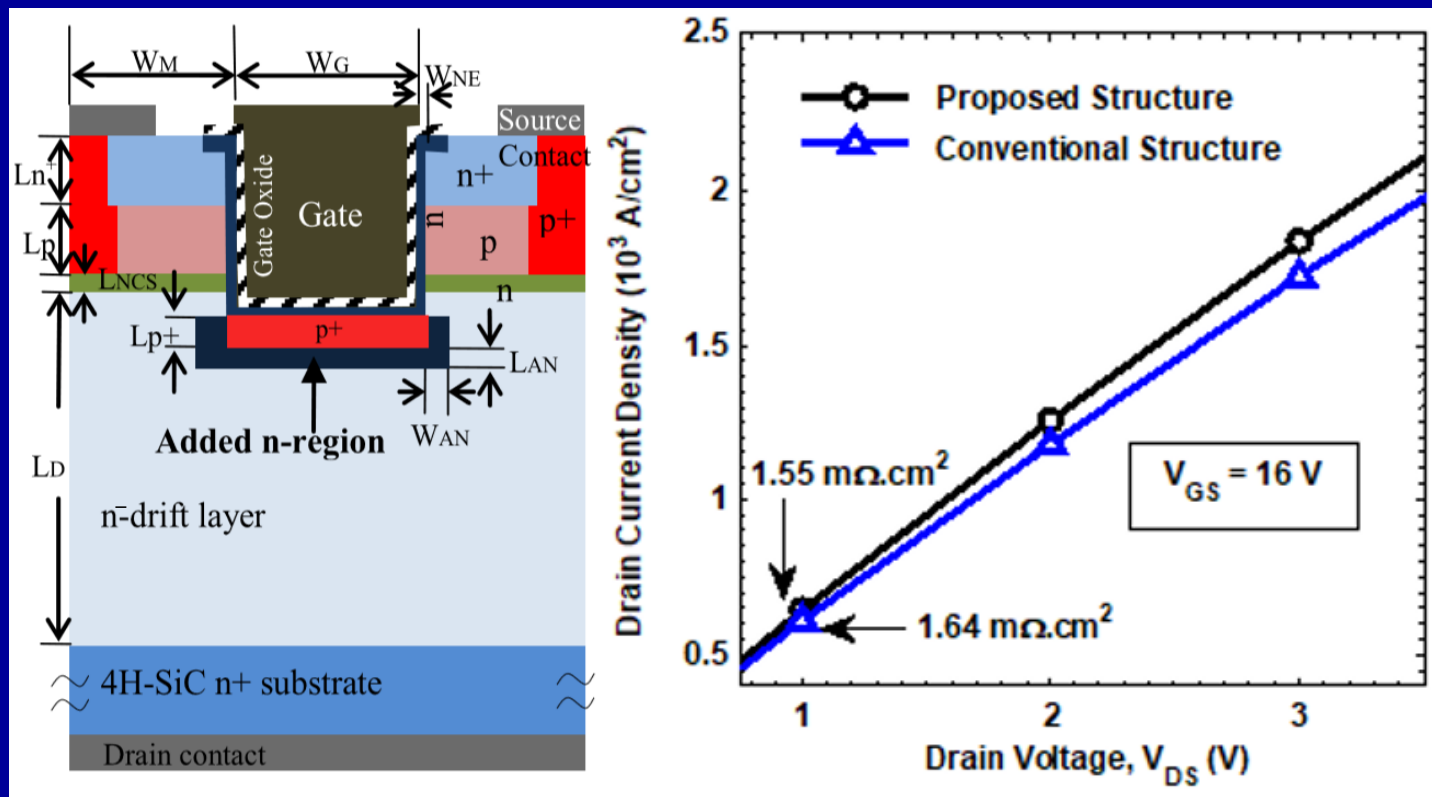
## ◆P型屏蔽层+电流扩散层



- ◆ P型遮蔽层有效降低U型槽底部存在的电场强度峰值
- ◆ P型遮蔽层同时也屏蔽了正向电流流动，导致导通电阻上升
- ◆ 引入一层中等掺杂的n层，作为电流扩散层，以消除屏蔽层的影响

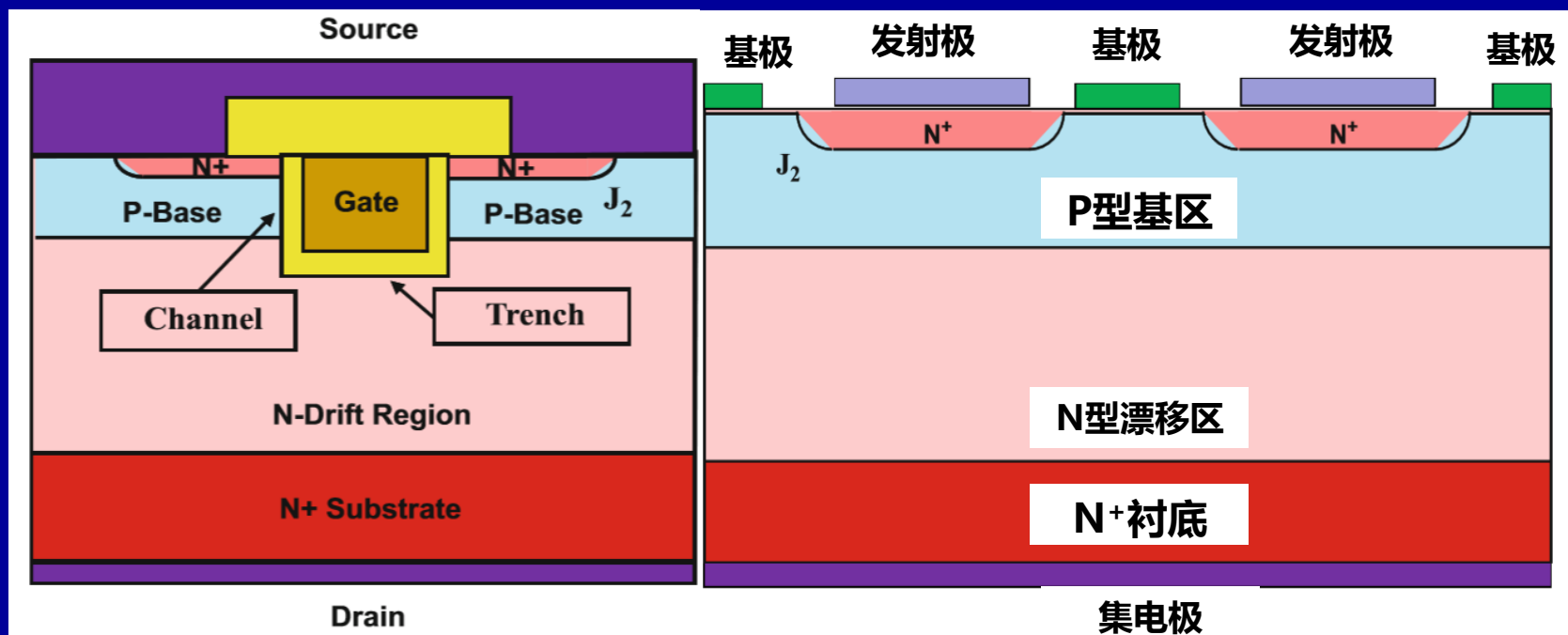
# 垂直MOSFET器件优化

## ◆P型屏蔽层



- ◆ 为了进一步减少P型遮蔽层对正向电流的影响，降低导通电阻，在P型遮蔽层外包裹一层中等掺杂的n层

# IGBT器件



## ◆ MOSFET的优点

- ① 电压控制器件 (栅极漏电流小)
- ② 驱动功率小
- ③ 开关速度快

## ◆ MOSFET的缺点

- ① 通态压降大
- ② 耐高压耐大电流能力弱

## ◆ Power BJT的优点

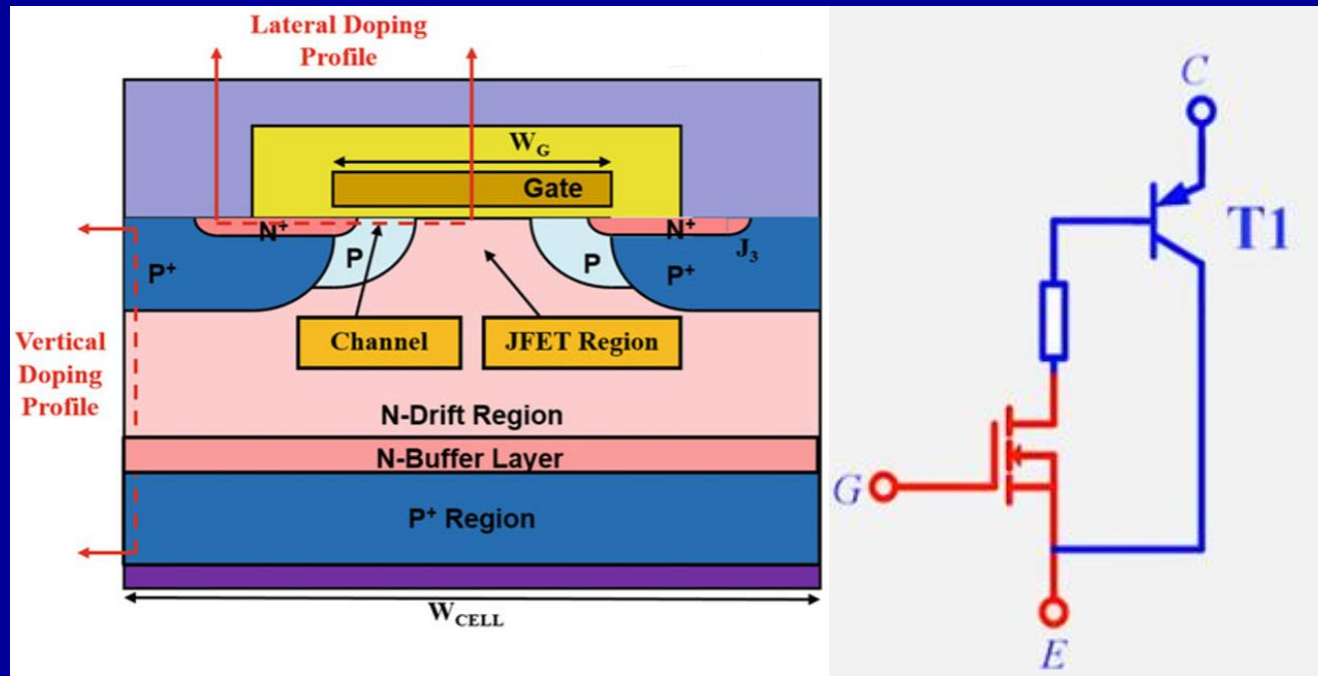
- ① 通态压降小
- ② 耐高压耐大电流能力强

## ◆ Power BJT的缺点

- ① 电流控制器件 (栅极漏电流大)
- ② 驱动功率大
- ③ 开关速度慢

# IGBT器件

◆ IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor), 绝缘栅双极型晶体管, 兼有MOSFET和Power BJT二者的优点, 常用于超高功率领域。



- ◆ Power BJT工作性能优异, 但控制不足
- ◆ MOSFET控制性能优异, 但工作性能不足
- ◆ IGBT= Power BJT + Power MOSFET (1+1>2)

# 有源器件总结

## 有源器件

晶闸管：第一代功率器件，半控型器件，仅用于功率控制

GTO：晶闸管的改良产品，全控型器件，但依然难控制

Power BJT：全控器件，通态压降小，耐高压大电流

### MOSFET

水平 便于功率IC集成设计，制备成本高

HEMT：可以实现超高频大电流工作，常用于功率射频放大领域

垂直：分立器件，制备成本低

IGBT：Power BJT 和MOSFET结合产品，可以耐受极高电压和极大电流

# 国外课题组

## ◆日本国家信息和通信技术研究

### ◆Masataka Higashiwaki

- ◆ 1998年获得了日本大阪大学的固体物理学博士学位。目前，他是日本东京国家信息通信技术研究绿色信息通信设备先进发展中心的主任。目前主要研究方向为宽禁带半导体氧化镓晶体管和二极管，是最早开始研究氧化镓功率器件的研究人员





# 国外课题组

## ◆ 康奈尔大学 Grace Xing

◆ 美国康奈尔大学电子与计算机工程教授，康奈尔大学电子与计算机工程学院和材料科学与工程系教授。IEEE fellow

◆ 他于北京大学获得了物理学学士学位，于利哈伊大学(Lehigh University)获得材料科学与工程硕士学位，于加州大学圣巴巴拉分校获得博士学位，并于2015年加入康奈尔大学。



◆ 研究兴趣包括：

- 1、III-V氮化物材料和器件，例如GaN HEMT等；
- 2、氧化物半导体材料和器件，例如氧化镓等；
- 3、低维材料和量子材料，例如氮化硼等；
- 4、逻辑和记忆材料和器件，例如自旋-轨道-扭矩场效应晶体管(SOTFET)等

# 国内课题组

- ◆西安电子科技大学 郝跃院士
- ◆中国科学院院士，微电子学家。西安电子科技大学微电子学院教授、博士生导师，兼任国家自然科学基金委员会信息学部主任
- ◆主要研究领域包括宽禁带半导体技术，深亚微米及超深亚微米器件物理，集成电路可制造性和可靠性理论与方法等。先后主持了多项国家科技攻关、863高科技项目、973计划项目、国家自然科学基金等项目，取得了突出成就。研究成果获国家八五重大科技成果奖一项，国家技术发明二等奖一项，国家科技进步二、三等奖各一项



# 国内课题组

## ◆香港科技大学 陈敬

◆陈敬教授于1988年获北京大学学士学位，并于1993年获美国马里兰大学博士学位。于2000年加入香港科技大学，现任电子及计算机工程学系教授。陈敬教授在国际期刊和会议论文集上发表论文300余篇。获得美国GaN电子器件技术8项专利。目前，他的团队专注于开发用于电力电子、射频/微波和高温电子应用的GaN器件技术。

◆**IEEE Fellow**，IEEE电子设备协会半导体器件和集成电路技术委员会的成员。《IEEE电子器件学报》的副主编，还曾担任《IEEE微波理论与技术学报》和《日本应用物理学杂志》的副主编



# 国内课题组

## ◆成都电子科技大学 张波

**个人简介：**微电子与固体电子学院副院长，校学术委员会委员、学位委员会委员，学院学位分委会主席。兼任国家“核心电子器件、高端通用芯片及基础软件产品”科技重大专项“高端芯片”实施专家组专家；2010年**国家科技进步二等奖**第一完成人，长期致力于功率半导体技术研究，**多次担任国际学术会议功率半导体分会主席，并三次受邀在国际学术会议做功率半导体领域特邀报告**；发表SCI、EI收录论文200余篇，获专利授权20余项。目前领导一个200余人的科研团队，在功率半导体分立器件、可集成功率半导体器件新结构、高低压工艺集成、电源管理IC和功率集成电路以及数字辅助功率集成领域开展研发



# 国内课题组

## ◆浙江大学 盛况

- ◆ 2008年获美国Rugters大学终身教职；2009年至今任浙江大学电气工程学院教授、博导，2017年起至今任浙江大学电气工程学院院长。
- ◆ 长期从事硅基和宽禁带电力电子芯片、封装及应用研究，包括芯片设计与工艺、器件封装与测试以及在智能电网、轨道交通、新能源汽车、工业电机、各类电源等领域中的应用，2009年回国创建浙江大学电力电子器件实验室，是国内较早开展碳化硅和氮化镓电力电子器件研发的团队。
- ◆ 课题组在器件理论、芯片研制、器件封测和应用方面取得了一些成果，相关的成果在国际顶级学术期刊及会议发表论文200余篇，引用次数2700次以上，获授权专利20余项（40余项申请中），2010年获浙江省自然科学二等奖，2019年获国家技术发明二等奖。





# 国内课题组

## ◆苏州纳米所 徐科

◆ 徐科，研究员、博士生导师，**国家杰出青年基金**获得者。2006年起加入中科院苏州纳米所，现任“863”计划新材料领域主题专家、国家纳米标准委员会委员。

◆ 围绕高质量氮化物半导体材料生长、相关材料与器件物理开展研究。发表SCI论文70余篇，申请专利40余项，国际专利一项。承担了国家自然科学基金、973重大研究计划、863项目、科技部国际合作项目、中科院装备研制项目等。



### ◆ 研究领域：

- (1) III族氮化物材料的生长与材料物理，极低缺陷密度材料的制备及物性研究；
- (2) 宽禁带半导体与超薄二维体系的异质结构物性研究；
- (3) 纳米测试分析理论与装备技术，空间高分辨的多参量综合测试技术与装备。

# 国内课题组

## ◆中国科学技术大学 龙世兵

◆ 龙世兵，博士，教授，中国科学技术大学微电子学院执行院长，从事超宽禁带半导体器件、存储器等领域的研究。IEEE高级会员，IEEE EDL/TED、Adv. Mater.等多种国际著名学术期刊的审稿人。国家自然科学基金优秀青年科学基金，国家杰出青年基金获得者。在IEEE EDL等国际学术期刊和会议上发表论文100余篇，SCI他引4000余次，5篇论文入选ESI高引论文（累计引用居前1%的论文）。获得/申请专利100余项，其中9项转移给国内最大的集成电路制造企业中芯国际，74项授权/受理发明专利许可给武汉新芯。获得2013年国家技术发明奖二等奖、2016年国家自然科学二等奖。



### ◆ 研究领域：

- 1、宽禁带半导体器件
- 2、功率电子器件/光电探测器
- 3、DRAM存储器/阻变存储器

# 功率半导体将成为“中国芯”的最好突破口

- ◆随着中美科技较量短兵相接，两会上代表委员们关于中国半导体产业发展的提案和建议备受瞩目。其中民进中央拟提交“关于推动中国功率半导体产业科学发展的提案”
- ◆以碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN）为代表的第三代半导体材料正蓬勃发展，而我国碳化硅、氮化镓功率半导体器件研发起步晚，在技术上仍有很大差距。可喜的是，在国家多项科研计划的扶持下，这方面已经大幅缩小了与国际的技术差距，并取得了不少成就，部分成果甚至处于国际领先地位。



**欢迎有理想有抱负的同学们  
加入到功率电子器件的研究中**