碳化硅二极管结构及其工作原理详解

**一、碳化硅功率器件概述**

随着终端应用电子架构复杂程度提升，硅基器件物理极限无法满足部分高压、高温、高频及低功耗的应用要求。近 20 多年来，以碳化硅(silicon  carbide，SiC)为代表的宽禁带半导体器件，受到了广泛的关注。SiC中存在各种多型体(结晶多系)，它们的物性值也各不相同。用于**功率器件**制作，**4H-SiC**最为合适。SiC材料具有**3倍**于硅材料的**禁带宽度**，**10倍**于硅材料的**临界击穿电场强度**，**3倍**于硅材料的**热导率**，如图1所示。因此 SiC功率器件在高频、高压、高温等应用场合更具优势，且有助于电力电子系统的效率和功率密度的提升。



图1 Si、GaN、SiC材料特性对比

**二、SiC功率器件的优势**

* **高耐压**

SiC的**绝缘击穿场强**是Si的**10倍**，与Si器件相比，SiC可以通过**更高**的**杂质浓度**和**更薄**的厚度的**漂移层**作出600V～数千V的**高耐压**功率器件。

* **低导通电阻**

对于**高耐压**功率器件来说，阻抗主要由该**漂移层**的**阻抗**组成，因此采用SiC可以得到单位面积导通电阻非常低的高耐压器件。理论上，相同耐压的器件，SiC的**单位面积**的**漂移层阻抗**可以**降低**到Si的**1/300**。

* **高频**

传统的Si材料为了改善伴随**高耐压化**而**引起**的**导通电阻增大**的问题，主要采用如**IGBT**(Insulated GateBipolar Transistor : 绝缘栅极双极型晶体管)等少数载流子器件(双极型器件)，采取这种方式会**引入开关损耗大**的问题，**发热**会**限制**IGBT的**高频驱动**。 SiC材料却能够以高频器件结构的多数载流子器件(肖特基势垒二极管和MOSFET)去实现高耐压，从而同时实现 "高耐压"、"低导通电阻"、"高频" 这三个特性。

* **高温**

SiC**带隙**较宽，是Si的**3倍**，因此SiC功率器件即使在**高温**下也可以稳定工作。



图2 Cree SiC肖特基二极管产品

**三、SiC二极管种类**

SiC功率二极管有4种类型：PiN 二极管、肖特基二极管(Schottky Barrier  Diode，SBD)，结势垒肖特基二极管(Junction Barrier Schottky Diode，JBS)和混合式PIN-肖特基二极管。

**四、PiN二极管结构及其工作原理**

PiN二极管的基本结构如图3所示。电力二极管为了承受高电压和大电流，内部结构和PN结有所不同，PiN二极管**中间较宽**的为**低掺杂**浓度的**N-漂移区**(也称为基区)，**两边较窄**的为**高掺杂**浓度阳极**P+**区域和阴极**N+**区域，称为**末端区**。



图3 PiN二极管结构示意图

在**正偏**时，**P区**和**N区**的**多子**会**注入**到**I区**，并在I区**复合**。当注入载流子和复合载流子相等时，电流I达到平衡状态。而本征层由于积累了大量的载流子而电阻变低，所以当PIN二极管**正向偏置**时，呈**低阻特性**。正向**偏压越大**，注入I层的电流就越大，I层载流子越多，使得其**电阻越小**。

当**反偏**时，由于实际的I层含有少量的P型杂质，所以在**IN交界面处**，I区的空穴向N区扩散，N区的电子向I区扩散，然后形成**空间电荷区**。由于I区杂质浓度相比N区很低，因此耗尽区几乎全部在I区内。在PI交界面，由于存在浓度差(P区空穴浓度远远大于I区)，也会发生扩散运动，但是其影响相对于IN交界面小的多，可以忽略不计。所以当**反偏**时，I区由于存在耗尽区而使得PIN二极管呈现**高阻状态。**

**五、肖特基二极管结构及其工作原理**

肖特基二极管的基本结构如图4所示，本质上就是**金属**和**半导体材料接触**的时候，在**界面**半导体处的**能带弯曲**，形成了**肖特基势垒**。金属和半导体接触的时候，**电子**会从半导体跑到金属里面去。半导体**失去**电子，就会**带正电**，形成空间电荷区(由不可移动的正离子构成)，这个空间电荷区，会阻止半导体的电子继续向金属移动，也就是说形成了肖特基势垒。当在肖特基势垒两端加上**正向偏压**(阳极金属接电源正极，N型基片接电源负极)时，肖特基**势垒层变窄**，其**内阻变小**，正向**导通**。反之，若在肖特基势垒两端加上**反向偏压**时，肖特基**势垒层**则**变宽**，其**内阻变大**，反向**截止**。



图4 肖特基二极管结构示意图

**六、结势垒肖特基二极管结构及其工作原理**

JBS 二极管的基本结构如图5所示，在JBS二极管中，阳极金属下方的**肖特基接触部分**和**P+区**部分**交错排列**。在**正偏**时，**仅**有**肖特基接触部分**参与**导电**，器件的特性类似纯肖特基二极管；在**反偏**时，肖特基结两侧的**P+区**和**N-外延层**构成的P+/N-结形成的**耗尽区**相互接触，对肖特基接触形成了屏蔽，显著**降低**了其下方的**电场强度**，从而**降低**了**漏电流**。通过改变P+区和肖特基区的尺寸，在保持肖特基金属不变的前提下，很容易地调节器件的正向和反向特性；同时，JBS二极管还保留了纯肖特基二极管单极性导通、开关速度快的优势。



图5 结势垒肖特基二极管结构示意图

**七、混合式PIN-肖特基二极结构及其工作原理**

MPS 二极管的基本结构如图6所示，除了**小尺寸P+区**外，还存在用于**提高**器件**浪涌可靠性**的**大尺寸P+区**。其中小P+区的作用和JBS二极管中的P+区完全相同，而**大P+区**的作用在于**提高**器件在**大电流**下的**导通能力**。在大电流下，大P+区对应的**PN结**将会**开启**，并向器件的漂移区**注入少数载流子**；由此产生的电导调制效应将会极大地**降低**器件的**电阻**。



图6 混合式-PIN肖特基二极管结构示意图

从器件的结构特征来说，**MPS**二极管和**JBS**二极管**无本质区别**，其结构特征都是**P+区**与**肖特基区**的**交替排列**。两种器件的区别在于其工作模式：在**JBS** 二极管中，**P+区**仅仅在器件处于**反偏时屏蔽高电场**，以**减小**肖特基结处的**漏电**，在器件处于**正偏**时并**不起作用**；在**MPS**二极管中，**P+区**在器件处于**反偏**时起到**相同的作用**，同时在器件处于**正偏且正偏电压较大**时，同样会**参与导电**，以**提高**器件**双极导通**能力。