

# 基于异质衬底的准垂直GaN二极管器件特性研究

李 想

西安电子科技大学 陕西 西安 710119

**摘要：**GaN属于第三代半导体，具有介电常数小、禁带宽度大、高电子饱和速度等特点，有着更好的高频、高温特性。通常用Johnson品质因数JFM和Baliga品质因数BFOM来表征半导体材料的高频大功率应用潜力。

**关键词：**SBD制备工艺及工作原理；基于Silvaco软件的仿真；器件优化

通过对比材料的品质因数可以看出，GaN在高压和高温功率电子器件的应用方面具有相当大的潜力。而近年来，人们对于GaN的研究兴趣不断深入，并且技术正在趋于成熟。

目前，主流的GaN功率器件是采用在异质衬底上外延的GaN横向器件，横向器件一般结构简单，在工艺上比较容易实现。垂直结构相比于横向结构，两者载流子运动方向不同。另一方面，垂直结构的版图利用率高。另外，垂直结构的热分布更为均匀，基于这些考量，垂直结构凭借其优良的应用前景成为了新的研究热点<sup>[1]</sup>。

图1所示的准垂直结构外延衬底主要采用Si和SiC，自上而下生长GaN缓冲层、传输层和漂移层。这样的准垂直结构器件能在较低的成本下来提高器件特性，有着超凡的潜力和应用前景<sup>[2]</sup>。

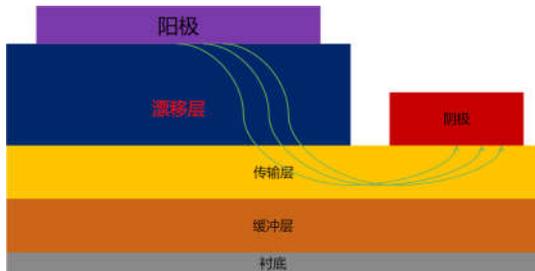


图1 准垂直结构SBD剖面图

## 1 准垂直 SBD 制备工艺及工作原理

### 1.1 基本工作原理

金属与半导体接触前，半导体的费米能级高于金属的费米能级，接触后半导体一侧电子流向能级较低金属一侧，最终使得两侧的费米能级平衡，而带电的空穴仍留在半导体一侧，形成了空间电荷区<sup>[3]</sup>。

当给器件施加正向偏压时，半导体一侧势垒高度降低，更多电子从半导体流向金属，这种情况被称为正偏。电子越过势垒导电产生电流。当正向偏压增大到开启电压时，SBD完全导通，电流电压呈现线性的关系。这个串联电阻是由GaN材料的电阻主导的，电阻率与掺杂

浓度和迁移率有关。另外厚度越大，电阻也随之增大。

### 1.2 下面讨论GaN SBD中的几种漏电机制：

热电子发射电流：当偏压为负值时，漏电流密度即等于反向饱和密度 $J_0$ 。 $J_0$ 的表达式：

$$J_0 = A^* T^2 \exp \left( -\frac{q\phi_B n}{kT} \right) \quad (2-1)$$

其值的大小与金属功函数与温度有关，而热电子发射电流是器件反向漏电流的理论最小值<sup>[4]</sup>。2 热电子场发射电流：主要是由于隧穿引起的，尤其是当反向偏压更大、较重掺杂的情况下，热电子场发射电流会占据主导地位。另外，反向偏压时的SBD在阳极边缘处，电场线发生弯曲，并在阳极边缘处形成了电场峰值。

对于SBD而言，理想的情况是低的 $R_{ON}$ 和 $V_{ON}$ ，以及低的反向漏电和高击穿电压，但实际上这些参数很难兼顾。在对器件设计和研究时，必须了解不同参数之间的相互关系，以便于更好的设计器件以满足要求。1 开启电压与反向漏电流：开启电压一定程度上与导通电阻 $R_{ON}$ 有关。另外势垒高度也是影响开启电压的因素之一。2 导通电阻与击穿电压：正向导通电阻的大小与击穿电压的平方呈正比关系。

## 2 基于 Silvaco 软件的仿真

### 2.1 器件基本参数及仿真

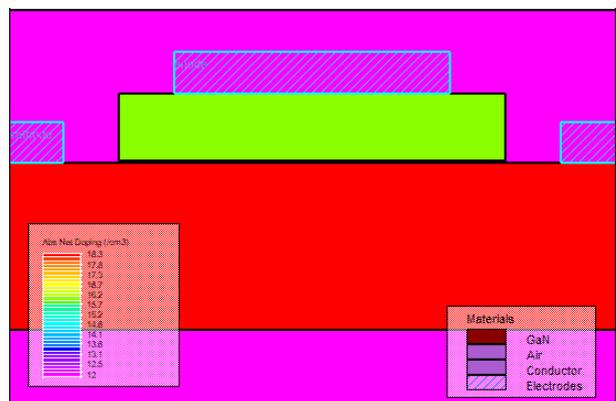


图2 器件基本结构

建立一个如图2中的器件结构，其中漂移层厚度为1.6 $\mu\text{m}$ ，掺杂浓度为 $9\text{e}15$ ；传输层厚度为4 $\mu\text{m}$ ，掺杂浓度为 $2\text{e}18$ 。采用1.8 $\mu\text{m}$ 厚的本征GaN作为缓冲层，阳极金属采用Ni（功函数为5.12eV），阳极金属长度为5 $\mu\text{m}$ 。

零偏时沿阳极下方0.2 $\mu\text{m}$ 处的漂移层以及漂移层底部上方0.2 $\mu\text{m}$ 处作两条cutline；另外沿阳极边缘与阳极中心

处水平作两条cutline。查看器件漂移层的局部电子浓度分布情况。

图2.1上方的两图分别为横向的两条cutlines，下方的两图分别为纵向的两条cutlines。对比分析图片可以看出，在阳极下方的一小块区域中，电子浓度低于其他区域，根据肖特基二极管的工作原理，这一小块区域即是耗尽区。

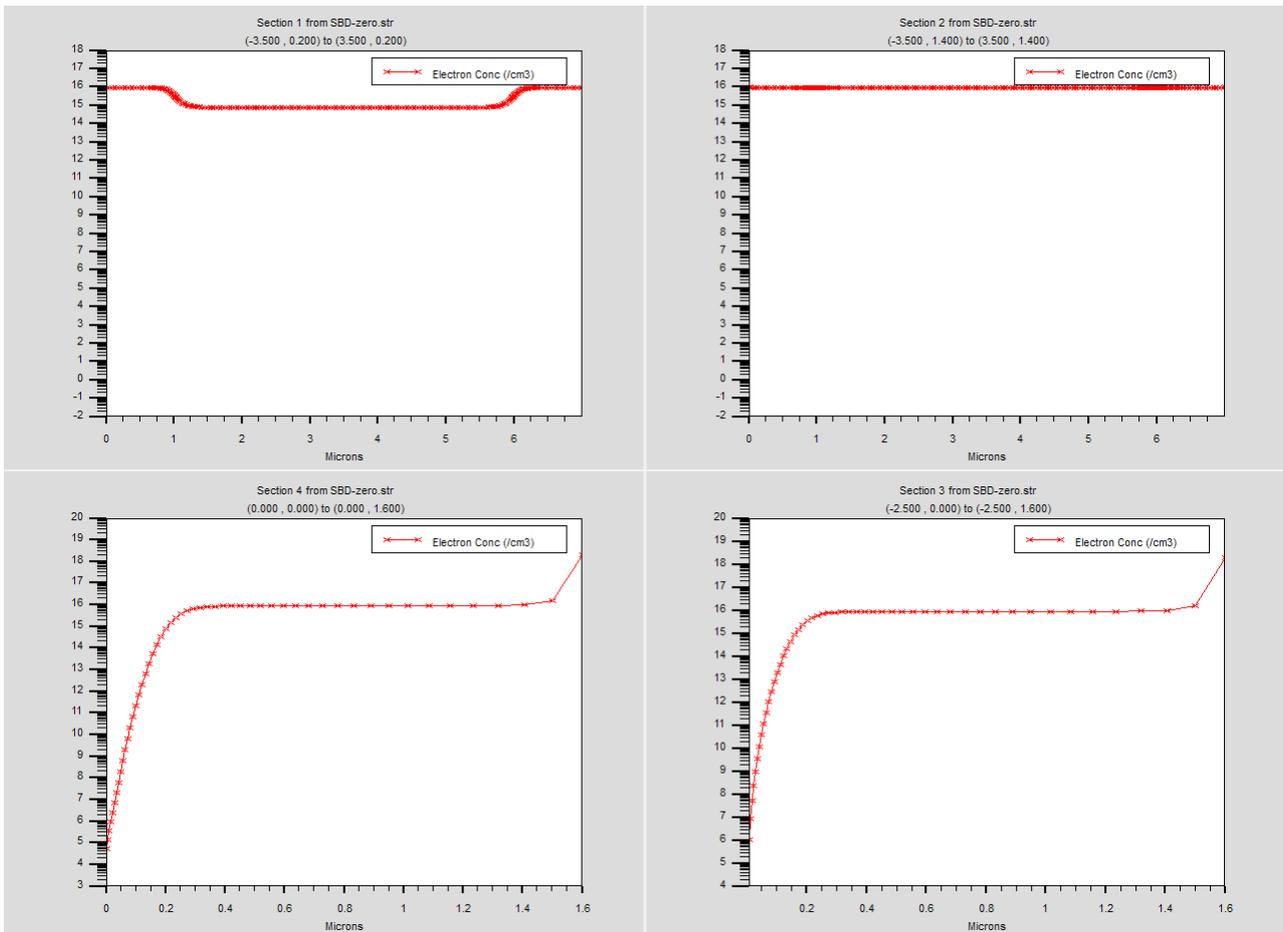


图2.1 电子浓度分布

设置阳极电压为0V，步长为0.1V，终点为5V,使用牛顿迭代法测量准垂直SBD的正向特性。得出如下曲线：

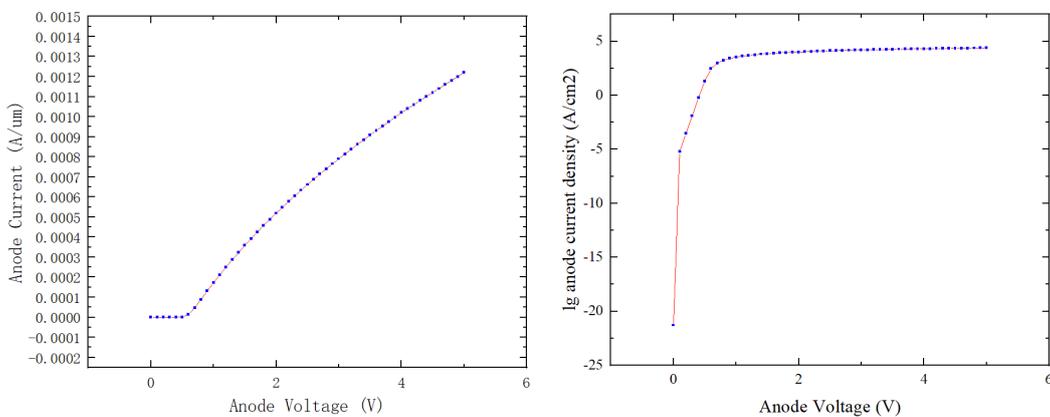


图2.2 正向特性曲线

正向偏压在约0.6V左右时，器件有正向电流通过，将此值近似为该准垂直SBD的开启电压。从图2.2中可以看出，在正向偏压足够大时，器件的正向IV特性呈现线性的关系，并计算出比导通电阻为 $0.188\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

在正向的电流密度曲线饱和时，电流密度的数量级

大约在 $10^4\text{A}/\text{cm}^2$ 左右。

给器件施加一个反偏电压，从0V开始，步长设置为-10V，终点为-100V，得到.str文件，在文件中查看反偏时SBD的电场和电势，图2.3所示。

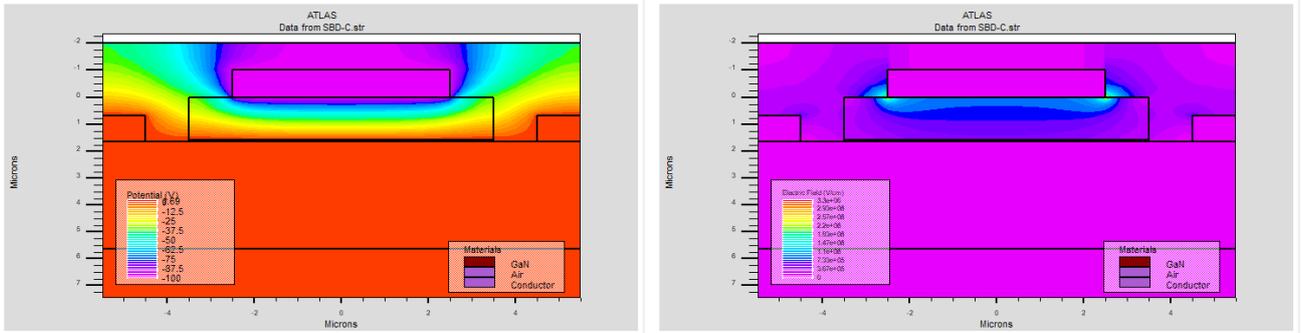


图2.3 反向偏置时器件的电势和电场分布

在Silvaco仿真中，我们难以仿真得到反向IV特性曲线，因此主要考虑通过反偏时的电场尤其是边缘电场来分析与讨论。

关于击穿电压的计算，通过GaN的击穿场强来近似。当器件阳极边缘出现 $3.3\text{MV}/\text{cm}$ 的电场时，我们可以认为器件击穿，此时的电压即为所求的击穿电压近似值。通过计算得到该垂直SBD的击穿电压约为 $36.8\text{V}$ 。

### 2.2 关于阳极功函数的影响研究

在本节的工作中，保持其他参数不变的情况下，改变阳极金属的选材，从原来的Ni（功函数 $5.12\text{eV}$ ）换为Pt（功函数 $5.65\text{eV}$ ）。在第二章中提到，金属功函数的提高，会使得金属一侧势垒高度增加，降低反向漏电。然而在Silvaco仿真中不易观测，因此，主要研究阳极功函数升高对开启电压以及导通电阻的影响图2.4所示。

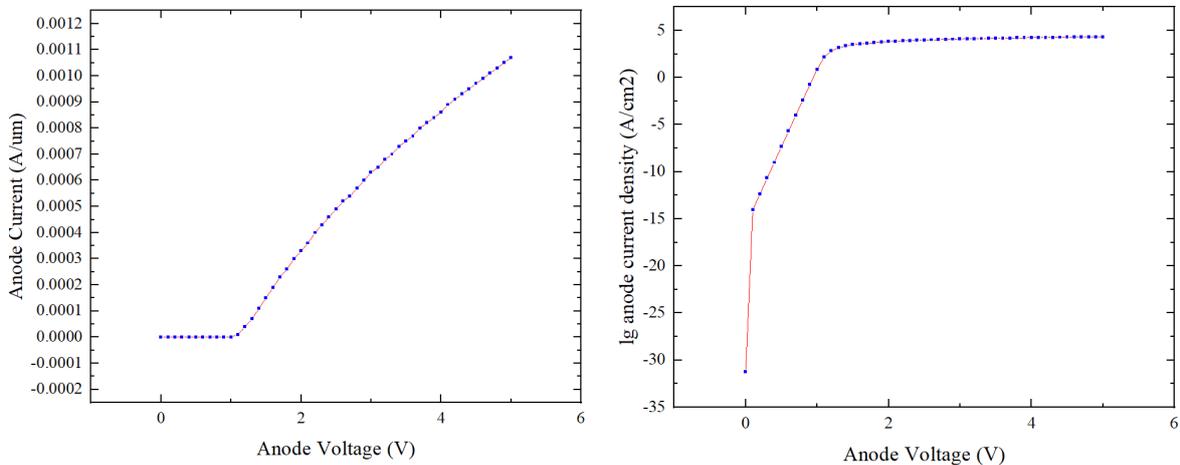


图2.4 更换阳极金属后的正向曲线

在阳极金属功函数从 $5.12\text{eV}$ 提升到 $5.65\text{eV}$ 后，开启电压升高到 $1.1\text{V}$ 左右，比导通电阻降为 $0.182\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。根据对数坐标下的电流密度曲线，饱和时的电流密度的数量级均在 $10^4$ 左右。

阳极金属更换后，虽然少量降低了比导通电阻，但也使得开启电压升高，并且对于饱和的电流密度也无明显的提升。

### 2.3 关于漂移层浓度及厚度的影响研究

首先考虑厚度的影响：在电阻率不变的情况下，漂移层厚度越大，导通电阻也随之增大，从而一定程度影响开启电压以及击穿电压。而关于漂移层浓度：掺杂浓度过高时，导通电阻会降低，但同时使得漏电流增大。

在图2.5的准垂直SBD的基础上，保持其他参数不变，将漂移层厚度从 $1.6\mu\text{m}$ 增大到 $2\mu\text{m}$ 。

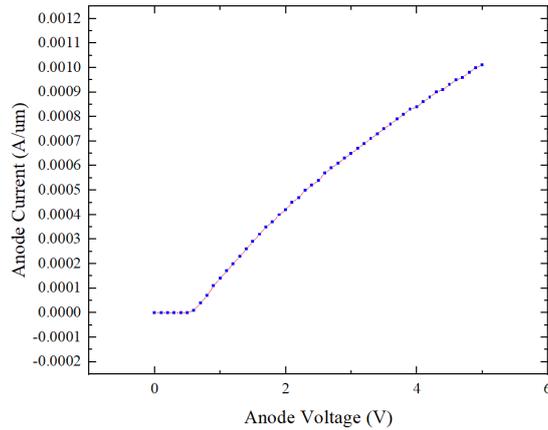


图2.5 采用2um漂移层后的正向曲线

通过仿真得到正向曲线，开启电压在0.6V左右。计算出比导通电阻增大为 $0.220\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

通过器件电场分布计算得到击穿电压近似值为38.3V。可以看出，漂移层厚度的增大会使得导通电阻和

击穿电压一定程度增大，而这种电阻的变化引起的开启电压变化较小。

基于图2.6的参数，保持其他参数不变，将漂移层掺杂浓度改为 $5\text{e}15$ 和 $5\text{e}16$ 分别进行仿真。

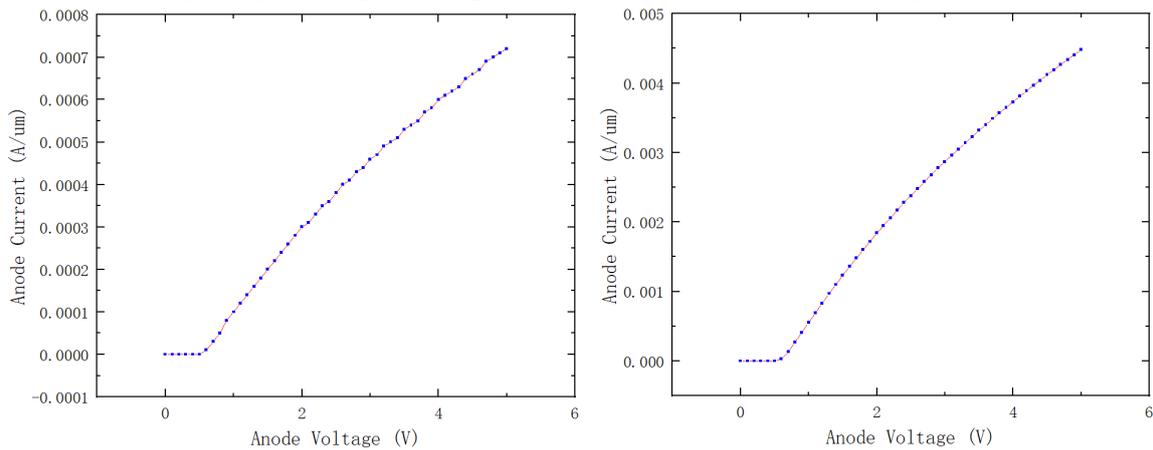


图2.6  $5\text{e}15$  (左) 和  $5\text{e}16$  (右) 的掺杂浓度下的正向特性曲线

根据图2.7中的正向特性曲线，掺杂浓度为 $5\text{e}15$ 时，开启电压为0.6V，比导通电阻为 $0.304\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ ；

而掺杂浓度为 $5\text{e}16$ 时，开启电压不变，比导通电阻为 $0.049\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

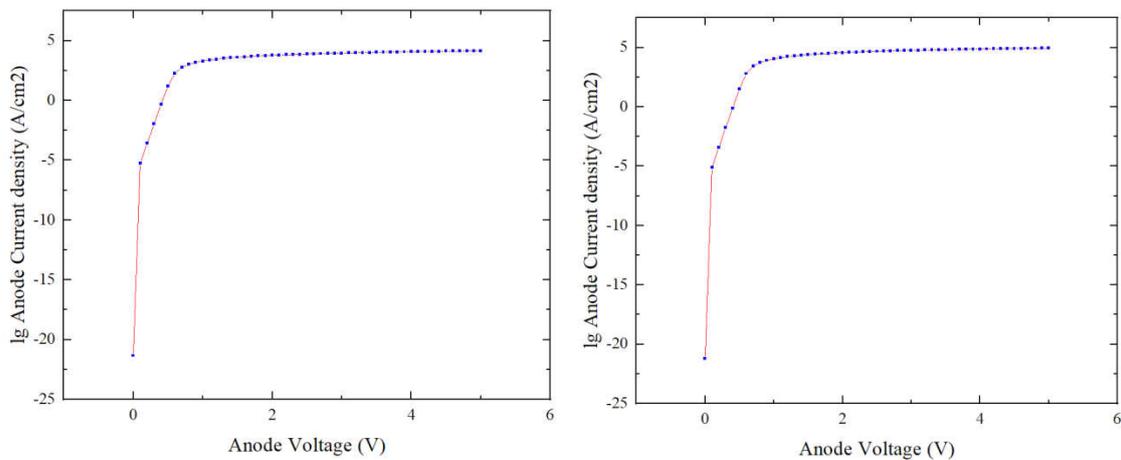


图2.7  $5\text{e}15$  (左) 和  $5\text{e}16$  (右) 掺杂浓度下的饱和电流密度曲线

对比两种掺杂浓度下的饱和电流密度， $5e16$ 的掺杂使得饱和电流密度增大了一个数量级到 $10^5$ 左右。

利用电场分布，通过线性计算得到击穿电压的近似值为46V。同理，对于 $5e16$ 漂移层掺杂，击穿电压仅为21.1V。

综合仿真结果，高的漂移层掺杂浓度会增强导电能力。然而，这样的高浓度掺杂，会显著破坏器件的击穿特性，但这种对于反向特性的恶化显然是我们不希望看到的。

综合上面的结论，对于阳极功函数，还是采用Ni作为阳极。而对于漂移层的浓度，将浓度定位 $5e15$ ，厚度保持不变，已得到一个各项性能较为平衡的准垂直SBD。以上的结论只是基于Silvaco的简单仿真，所得出的具体数值并不能完全代表实际器件的表现，主要是通过这些数据进行定性的分析，只是为了研究器件的各项参数的变化对于器件性能的影响，而非为了准确计算器件的实际工作参数。本章分析了掺杂浓度、厚度以及金属功函数等主要的参数的影响，所得出的结果基本与理论分析相符。

### 3 关于器件优化的进一步探讨

#### 3.1 W阳极

W的金属功函数为4.5eV，比Ni金属要低。采用W阳极能降低开启电压，也会一定程度的破坏反向特性。2019年西安电子科技大学的边照科等人报道了W阳极相关的研究：通过W阳极把开启电压从0.6V降低至0.39V；与此同时其击穿电压有所降低，但依然在一个较好的范围内<sup>[5]</sup>。

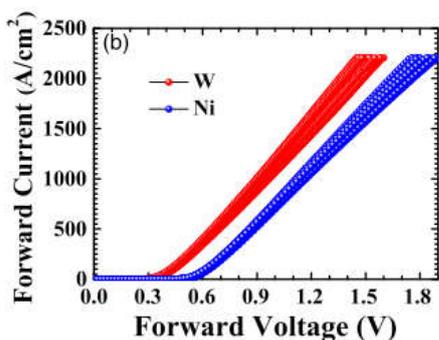


图3.1 正向特性对比

从图3.1中可以看出，W阳极的使用使得开启电压降低，而在饱和时的电流密度的数量级相差不大。而W阳极使得 $I_{off}$ 有所增大，从而在开关电流比的表现上，略逊于Ni。另外，二者的比导通电阻均低于 $1m\Omega \cdot cm^2$ 。

反偏时，在高偏压下，两种SBD的漏电流密度的差值不大。而在低反向偏压下，由于势垒高度的降低，二

者的热电子发射电流差距较为明显，但根据实际测量的结果，W阳极器件的漏电流密度变化远低于理论值。另外关于击穿电压，将漏电流密度为 $1A/cm^2$ 时的电压作为击穿电压的近似值，W阳极与Ni阳极SBD的反向的电压-电流密度曲线如下：

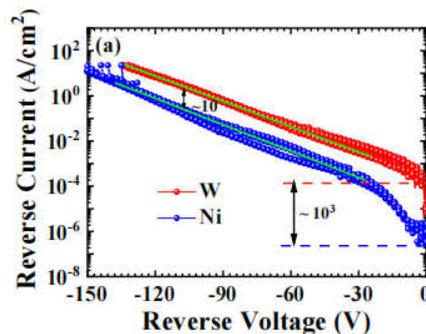


图3.2 反向偏置下的电压-电流密度曲线

计算出的Ni器件在约-118V击穿，而W器件在约-98V击穿。

W阳极显著改善了开启电压，击穿电压以及导通电阻的表现与Ni阳极相差无几；而在漏电流以及开关比方面，虽然稍有逊色，总体来看W阳极是一种可取的方案。

#### 3.2 氧终止技术

在此引入平均击穿电场的概念，在以某一漏电流值作为击穿临界电压点的情况下，击穿电压的值等于平均击穿电场与漂移层厚度的乘积：

$$V_{br} = E_{av}d \quad (4-1)$$

考虑到阳极边缘处的电场峰值现象，平均击穿场强的大小，反映了边缘峰值对于击穿电压的影响大小。

氧等离子体表面处理是通过离子体ashing仪器，在一定的功率下进行处理，从而在阳极边缘处产生薄的氧化层，这样的表面钝化工艺使得势垒高度增大，进而抑制反向漏电。2020年，西安电子科技大学的边照科等人报道了关于氧等离子体表面处理的SBD<sup>[4]</sup>，漂移层厚度为1.3um，击穿电压为193V，平均击穿电场为1.48MV/cm，开启电压为0.71V，比导通电阻为 $0.2m\Omega \cdot cm^{2[6]}$ 。

在反向漏电的表现上，经过表面处理的SBD要显著优于未经处理的SBD。而经过表面处理后的SBD不仅有着较高的击穿电压和较低的导通电阻，且标准差较小，意味着处理得到的器件没有很大的个体差异，很好的反映了总体特征。

在图3.3 (a)中对比了一些研究中器件的击穿电压及导通电阻表现，在击穿电压与导通电阻的表现上，这项工作中的SBD要优于其他异质衬底SBD的表现，甚至能够

比拟GaN自衬底SBD。而4.3 (b) 图中对比了一些研究中器件的平均击穿电场以及开启电压,氧等离子体处理使

得器件在保持SBD开启电压优势的同时,显著改善平均击穿场强,发挥GaN的材料优势。

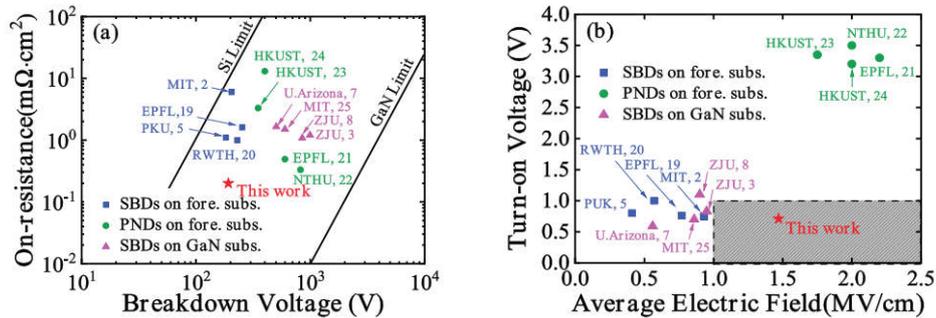


图3.3 与其他研究以及材料极限的对比

### 3.3 场板结构

场板是一种优化边缘电场的结构,通过在阳极极板边缘加上一块延伸的金属板,使得漂移区内电场发生改变,从而改善器件反向时的边缘电场峰值。通过silvaco仿真得到器件的正向特性曲线,将无场板SBD与有场板的SBD进行对比,两者极为相似。通过正向曲线,可以计算出它们正向的性能参数:开启电压约为0.6V。有场板SBD比导通电阻的大小为 $0.272 m\Omega \cdot cm^2$ 。无场板SBD的比导通电阻约为 $0.273 m\Omega \cdot cm^2$ 。

场板能够在几乎不改变正向特性的同时,对反向漏电和击穿电压有所改善,是一种有效的场终端结构。最终得到了一个导通电阻 $0.272 m\Omega \cdot cm^2$ ,击穿电压43.2V,开启电压为0.6V的准垂直SBD。

### 结束语

本文探讨了基于异质衬底的准垂直结构。并且对氮化镓SBD从原理、性能指标以及影响因素等方面进行了讨论和分析。总的来说GaN作为性能优异的半导体材料,在未来一定会有广阔的用途。相信在众多研究机构与学者的努力下, GaN器件在未来一定会有更好的表现

和潜力!

### 参考文献

- [1] Johnson E. O. Physical limitations on frequency and power parameters of transistors[J]. RCA Review. 1965,12.163.
- [2] Baliga A. J. Power semiconductor device figure of merit for high frequency applications[J]. IEEE Electron Device Lett. 1989, 10. 455.
- [3] Donald A. Neamen. 半导体物理与器件[M]. 赵毅强等,译.北京:电子工业出版社,2018.
- [4] 边照科. 准垂直结构GaN肖特基二极管研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2020.
- [5] Zhaoke Bian et al. Leakage mechanism of quasi-vertical GaN Schottky barrier diodes with ultra-low turn-on voltage[J]. 2019 Appl. Phys. Express 12 084004.
- [6] Z. Bian et al.  $1.48 MV \cdot cm^{-1}/0.2 m\Omega \cdot cm^2$  GaN Quasi-Vertical Schottky Diode via Oxygen Plasma Termination[J]. IEEE Electron Device Letters, vol. 41, no. 10, pp.1476-1479, Oct.2020.