

氮化镓功率晶体管之基础

宜普电源转换公司 Stephen L. Colino Robert A. Beach

我们对功率半导体最基本的要求是性能、可靠性、管控性及成本效益。它的高频率性能，可切合稳压器系统于体积及瞬态响应方面的需要而具更高价值，并为D类功率放大器提供高保真度。一个新器件结构如果不高效率、不可靠的话，根本不可能商品化。市场上有很多新结构及原料可选择，但是接受度有限。不过，现在有氮化镓(Gallium Nitride/GaN)增强型功率管控器件问世，具有高导电性、极快开关、硅器件之成本结构及基本操作模式等优异性能，其代表就是宜普公司的新产品。

器件构造

一个器件的成本效益，从生产基础设施开始计算。宜普公司的工艺技术，基于不昂贵的硅晶圆片。在硅基板上有一层薄薄的氮化铝 (Aluminum Nitride/Al)，隔离了器件结构和基底。这个隔离层能隔离300V电压。在这隔离层上是一层厚厚的氮化镓，晶体管就建立于这个基础上。其中，电

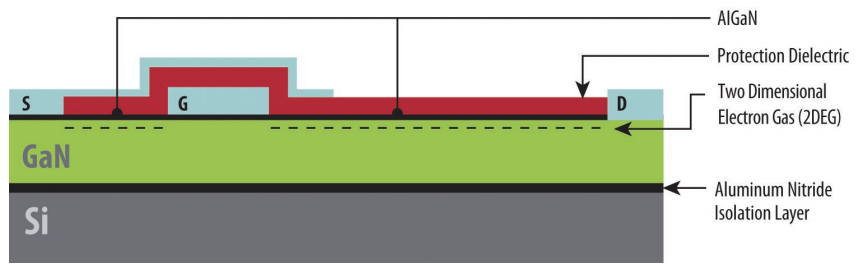


图1 EPC之氮化镓功率晶体管结构剖面图

子由氮化镓铝层(AlGaN)产生，其会产生引力场，吸引大量的自由浮动电子，而进一步的工艺会在栅极下面形成一个耗尽区域。要增强晶体管，正电压加在栅极处，正如开启一个N通道、增强型之功率MOSFET。

图1显示了这个器件结构的剖面图。该器件的表现跟硅功率MOSFET相似，当然也有不同之处，我们将再作阐释。

操作

宜普氮化镓晶体管的表现跟硅功率MOSFET非常相似。

在栅极上，相对于源极，一个正偏压会产生吸引电子的场效应，构成基极与源极之间的通道。由于电子被集中在一起，不会零散地困于某一格位置，这个通道的电阻因而很低。从栅极移去偏压，下面的电子会分散至氮化镓层，重新产生耗尽区域，从而阻

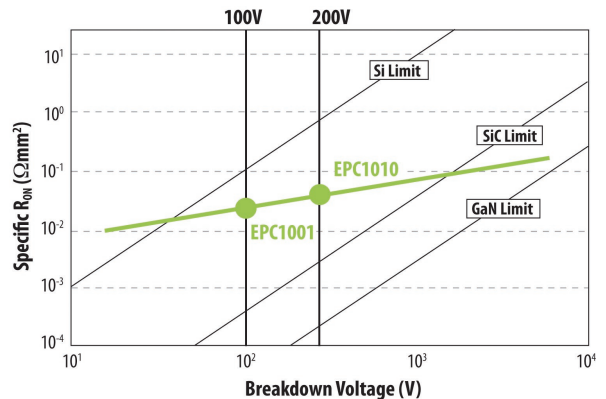


图2 氮化镓及硅器件于不同电压下的性能

隔电压。

要制成一个高压器件，需增加漏极与栅极之间的距离。由于氮化镓的电子被集中在一起时的电阻非常低，所以纵使增加阻隔电压之能力，若与硅器件相比，其对电阻的影响会更少。图2显示了理论上的氮化镓及硅器件于不同电压下的性能极限，及宜普第一代器件的效能。

各位电子工程界朋友均知道硅制MOSFET已开发了三十年，其表现已接近理论上的极限，若希望其表现再进一步，将需要庞大资源去开发。相对来说，氮化镓器件处于产品发展周期的起步阶段，在数年内将可预见其重大进展。

栅极临界

氮化镓晶体管的临界比硅功率MOSFET低，这样是有可能的，因为

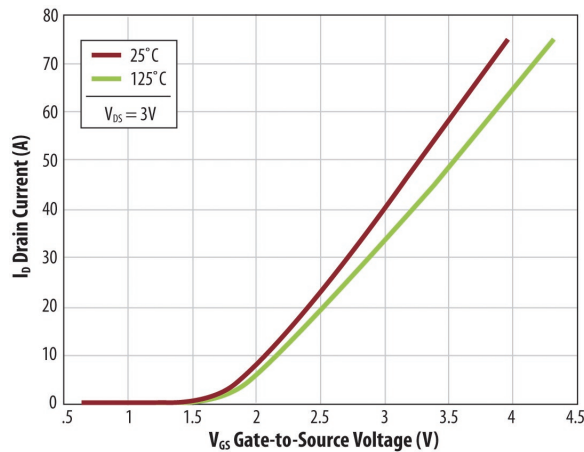


图3 传输特征曲线图

临界不会随温度变化及具备很低的栅漏极间电容(C_{GD})。

图3显示了宜普1001(100V, 5.6mΩ)的晶体管传输特征曲线。当器件在1.6V电压时开始传导大量电流，于dV/dt转变时，栅极到源极之间为低电阻。

电阻

阻抗($R_{DS(on)}$)及栅源电压(V_{GS})曲线图是跟MOSFET相似的。宜普第一代氮化镓晶体管专为5V驱动器操作而设。

图4显示了宜普1001的一系列曲线图。当栅极电压越接近最高水平，漏极对源极的电阻则会持续下降。由于栅极驱动器损耗极少，所以氮化镓晶体管应以5V电压驱动。氮化镓晶体

管之电阻 $R_{DS(on)}$ 温度系数为正数，但幅度比硅MOSFET小很多，例如，在125°C时，宜普1001系数为25°C时的1.45倍，而硅功率MOSFET则是1.7倍。这个优势会随着电压增加而增强。

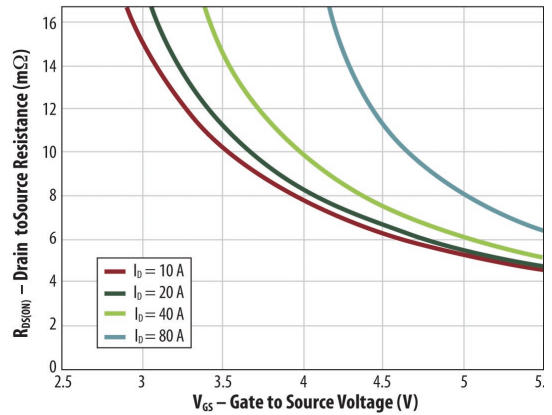


图4 不同电流下 $R_{DS(on)}$ 与 V_{GS} 的比较

电容

氮化镓晶体管的横向结构使其具极低电荷特性，能够在数纳秒内切换数百伏特，切换频率可达数兆赫，这个性能可缩小功率转换器体积，并使D类功率放大器具更高的保真度。栅漏极间电容(C_{GD})是最重要的，因为它最能影响切换功率损耗。宜普氮化镓场效应晶体管因为具极低 C_{GD} ，致使电压切换非常迅速。相比 C_{GD} ，栅源极间电容(C_{GS})较大，使氮化镓晶体管拥有优异的dV/dt抗扰性能。相比硅MOSFET，栅源极间电容(C_{GS})较小，延迟时间很短，因此应用于低负载周期时具极佳管控能力。

根据实例证明，一个1~48V降压稳压器使用宜普之100V氮化镓晶体管，可于1MHz切换频率下表现理想。与硅MOSFET比较，氮化镓晶体管之 C_{DS} 也较小，虽然二者之电容曲线相

似，但在相同电阻下，最大不同之处是氮化镓晶体管之电容是极低的。

串联栅极电阻及栅极漏电流

串联栅极电阻(R_G)限制了FET的电容充电或放电速度。硅MOSFET只能用多晶硅或混合材料类的金属硅化物；氮化镓晶体管则用金属栅极，栅极的电阻很低，只是 $1/20\Omega$ ，具

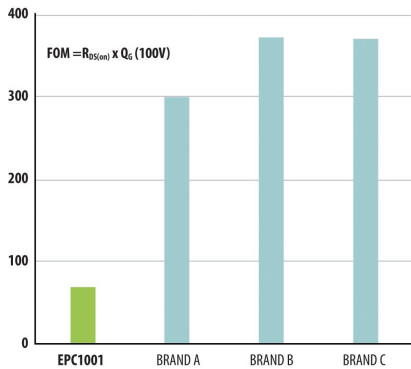


图5 氮化镓晶体管与最优100V硅MOSFET器件之FOM比较

dV/dt 抗扰能力，并且不会以氧化增生来隔离栅极。相比硅MOSFET，氮化镓晶体管栅极漏电流较大，预计在 $1mA$ 。

优异指标

总栅极电荷(Q_G)是 C_{GS} 加 C_{GD} 除以电压。常用的指标FOM是 $R_{DS(on)}$ 乘以 Q_G ，显示了器件在开启状态及切换时的表现。图5展示了氮化镓晶体管与最优硅MOSFET 100V器件之FOM比较。当电压增加，其 $R \times Q$ FOM更具优势。

基板二极管

从图1可见，宜普氮化镓晶体管结构是一个横向器件，没有硅MOSFET常见的寄生二极管。严格来说，其反向偏压与二极管具相似功能但机理不同。如果栅源电压是零偏压，栅极下方就没有电子。当电流从源极至漏极，漏极电压会减弱。相比漂移区域，栅极上正偏压形成后会把电子注入栅极下面。在栅极临界时，将有足够电子形成一个传导通道，其好处是在传导中没有少数载流子，所以没有反向恢复损耗。当 Q_{RR} 是0时，输出电容 C_{OSS} 需要在每次开关周期内充电或放电。相比硅MOSFET，若器件的 $R_{DS(on)}$ 相仿，则氮化镓晶体管具更低的 C_{OSS} 。氮化镓晶体管在反向时需临界电压去开启，二极管之正向电压会比硅晶体管为高，所以必需把二极管导

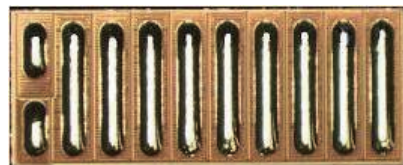


图6 宜普1010晶体管

电减至最小。

封装

宜普氮化镓晶体管与底层绝缘，可以在单晶圆上制造多个不同配置，快速散热及不需绝缘接口之晶体管。它可以在晶圆片的一边凑集漏极及源

极电流。若果要凑集电流的金属层具低电阻，这些通道必需短小。要做到这样，可利用芯片线栅门数组封装，把漏极及源极线交替排列。标准的线距是 $0.4mm$ 及 $0.6mm$ 。图6展示了宜普1010晶体管封装($200V$, $25m\Omega$)。如果任何部份之沿面放电距离不能达到安全要求，可用underfill方法来达到其所需安全距离。

应用及价值

宜普设计的增强型氮化镓晶体管，具有高效、高频、低负载周期功率转换的优势。其可于频率高于AM band时，透过高效开关，大幅提升D类功效音频放大器技术。因没有线性放大器之体积及重量的所有限制，保真度可接近A类及AB类放大器系统水平，并可把高质素放大器放进只有细小器件空间的产品里，如平面电视、电脑及扬声器。

于处理信息及储存系统方面，整个功率架构可重新评估，以发挥其优异的开关性能。当AC/DC转换器输出电压增加，效率会更高；当总线电压增加，传输效率会提高；当频率增加，体积会更小。如果应用为同步整流器，可同时提高AC/DC转换效率。如果只是一次转换，可撤用中间阶段转换器，省却中间阶段转换器之体积及成本。

EPC