

宽禁带半导体器件在高频电力电子变换器中的应用研究

杨 玺

四川水利职业技术学院电力工程学院 四川省崇州市 611231

摘要：随着电力电子技术的进步，宽禁带半导体器件（如 SiC 和 GaN）以其耐高温、耐高压和耐高速性能，正逐渐成为高频电力电子变换器的核心器件。本文首先对宽禁带半导体器件的基本特性及相比传统硅器件的优势进行介绍，然后详细分析了宽禁带半导体器件在高频电力电子变换器中的应用，尤其是强调其在改善能源转换效率、提高系统频率响应以及改善系统稳定性方面的重要贡献。最后，基于目前存在的技术问题，对宽禁带半导体器件未来在高频电力电子变换器的发展趋势和可能面临的挑战做出展望。本研究表明宽禁带半导体器件应用能够有效提高转换效率，节省空间，改善热控制，具有广阔的应用前景。

关键词：宽禁带半导体；高频电力电子变换器；SiC；GaN；效率提升；热管理；高温高压

引言

随着能源需求量的不断增加，电力电子技术的应用范围越来越广，正逐步从电力电子系统拓展到高频电力电子变换器。但传统的基于硅 (Si) 材料的电力电子器件无法满足高频率、高温、高压等复杂系统的要求，影响电力电子变换器的能量输出。因而，热导系数高、载流子饱和漂移速率快的宽禁带半导体碳化硅 (SiC) 和氮化镓 (GaN) 越来越多地被视为用于高频电力电子变换器的材料。本文重点介绍了宽禁带半导体器件在高频电力电子变换器中的应用，对宽禁带半导体器件的电力电子变换器的性能优化、规模缩小及散热等提出了各自的贡献分析。

1、研究背景

1.1 电力电子变换器的应用现状

在日益增长的能量需求和日益增强的绿色意识推动下，电力电子技术的应用几乎涉及所有电力系统。电力电子变换器是电力系统中供电源和用电者之间的桥梁，这种中间元件在近几十年里被广泛地应用到风力发电、智能电网、电动汽车、电动控制和工业自动化、电力的输送等领域，尤其是在电动汽车领域中，对电力电子变换器的主要性能的要求是更高效率、更大功率密度和更高的安全性；而传统基于硅的半导体元件不能满足这些要求，因此基于新的宽禁带半导体的器件作为替代传统电力电子元件，因其具有热稳定性、快速的高频响应和高压性能，是将来高效电力转换器组件的替代品。

1.2 宽禁带半导体器件的发展历程与优势

宽禁带半导体主要以碳化硅 (SiC) 以及氮化镓 (GaN) 材料为代表，这些材料拥有大于传统材料硅的禁带宽度，使其在高温、高压以及高速下拥有特殊的性能。20 世纪 90 年代开始便开展了对 SiC 材料的研究和应用，在碳化硅器件方面，其卓越的耐高温特性和耐高压能力使该材料被迅速应用于高压功率变换系统中。另一方面，氮化镓作为另一宽禁带半导体材料，凭借其优异的高速特点以及低通态损耗，其在高速功率变换方面已表现出巨大的优势。随着制造工艺的不断提高，SiC 以及 GaN 的价格也随之下降，他们的市场推广进程正在不断加快。

2、宽禁带半导体器件的基本特性

2.1 SiC 与 GaN 的材料特性

2.1.1 热稳定性和材料的禁带宽度的关系。

SiC、GaN 的禁带宽度为 3.26eV 、 3.4eV ，均高于硅 (Si) 的 1.1eV 。随着半导体的禁带宽度增大，半导体耐压也升高，换言之，相同电流量条件下，宽禁带半导体器件面对的电压就会高一些，电压承载能力更强、电力转换器能量密度表现更好。而且由于宽禁带物质的禁带宽度比较大，高压也能稳定运行。

2.1.2 导电性能与高温工作能力

SiC 和 GaN 在通态方面的优势也非常突出。相比于硅，SiC 的导电速度更快，能使其在高频条件下传输有更大的发展空间。GaN 具有更优秀的电子传输速度，使其在高频高

压的电力电子转换器件方面得以充分利用，在开态和关态上的转变速度可以更加迅速，GaN 器件开闭时间更快，因此，在需要高速度运行的条件下，GaN 的优势是无可替代的。

2.2 宽禁带半导体器件的主要类型

2.2.1 SiC 基器件：MOSFET、JBS 二极管等

SiC 基半导体器件被认为是宽禁带器件中最普遍的器件，其在电力电子转换器中的应用是极为广泛的。其中，SiCMOSFET(金属氧化物半导体场效应晶体管) 是重要的一种 SiC 器件，具有高电压耐受力、低开/关功率损失等特点，使其可以在高速电力转换器实现高效与紧凑的布局。SiCMOSFET 应用范围十分广泛，如电动车动力系统、太阳能逆变器等。

2.2.2 GaN 基器件：HEMT、二极管等

从近年来大量研究情况来看，GaN 基器件得到了广泛的重视，其中基于 GaN 基材料的 HEMT (高电子迁移率晶体管)，由于拥有较为优异的高频性能而备受青睐。该技术具有较低的导通电阻、快速的切换速度，拥有在高频应用中较为高效的性能，适用于无线能量传输、电动车充电等场景。

3、宽禁带半导体器件在高频电力电子变换器中的应用

3.1 高频电力电子变换器的要求

在现代的电气系统当中，高频电力电子变换器属于支柱性的产品，且多用于电动车、光伏逆变器、电能传输以及医疗器械中。但由于该部分高频电力电子变换器经常需要在高速运转状态下工作，对于一般的硅基半导体产品来说可能无法满足需求，因此采用宽禁带半导体作为高频电力电子变换器核心器件的设计策略是相当重要的。

首先，对于高频电力电子变换器而言，重点关注的即为效率和高功率密度。电力电子变换器要求快速转换，在此转换中，通常开关频率需要在几十千赫兹以上。但是随着开关频率的升高，开关损耗也随之显著增加，因此，为了确保系统的长期稳定性，使用具有低开关损耗和高效率的器件提升器件的性能。例如，宽带隙半导体 SiC、GaN 由于其较低的开关损耗和高耐压能力能够大幅提升高频变换器的性能。

再次重申，第二个主要标准就是对转换器在极限高温及高压条件下可靠性的要求。由于工作的要求，高频电力电子器件往往会面临严重的温升及高压状态挑战，传统硅器件因为其低热稳定性及击穿电压过小，很难连续稳定地运行。而通过使用宽禁带半导体元件就可以在恶劣工作条件下保

持相对较小且高效的功率消耗及高可靠性。

因此，高频电力电子变换器应采用宽禁带半导体器件来适应其高频、高效、高功率密度、高温稳定性的要求，从而确保变换器能够实现恶劣环境下运行的稳定性能。

3.2 宽禁带半导体器件的应用现状

随着宽禁带半导体的功能增加，其在高功率电力电子转换装置的应用也快速发展。SiC 和 GaN 为平台的器件已经广泛应用于诸多领域，在电动汽车 (EV)、太阳能发电、无线电力传输 (WPT) 等方面已经显示出突出的成绩。

SiCMOSFET 在电动汽车中的应用已经成为电动汽车功率变换系统的重要元件，如在电动汽车电池管理、逆变器以及充电桩上都有广泛的应用。利用 SiCMOSFET 能够大大降低系统整体的转换损耗和运行功耗，从而提升电动汽车整体的转换效率，延长电池寿命，增加续航里程。此外，SiC 二极管也应用在了电动汽车直流电源转换过程中，能降低电流纹波并提升系统的稳定性。

3.3 提升电力转换效率的案例分析

案例 3：sicmosfet 在电动汽车电动机驱动系统中的应用。

EV 驱动系统作为一种常见的电力电子转换装置，有着大量的电能变换需求。传统的 Si 基 MOSFET 在用于 EV 逆变器过程中存在较大的开关损耗，从而影响整机效率，而 SiCMOSFET 的导通与开关损耗更低，可以使其在高压工作状态下仍拥有极高的效率。例如，在某款 EV 驱动系统中，将系统中的 Si 基 MOSFET 替换为 SiCMOSFET，实验结果表明开关速率提高 30% 以上，系统效率也提升了 5% 左右，这有助于进一步提升 EV 的续航能力，并有效提升 EV 对电池能量的利用效率，最终实现系统效益的最大化。

例 3：光伏逆变器应用 sic 二极管。

光伏逆变器是实现阳光发电的重要能量转换装置，光伏逆变器的性能将直接影响光伏发电的效果。传统的硅基二极管的光伏逆变器具有开关率低以及开关损失大的缺点，但当用 SiC 二极管替代后，可以大大提高光伏逆变器的开关速率，并降低导通损失 20% 以上。这可以实现光伏逆变器效率提升 6—8 个百分点，缩小光伏发电设备的体积和质量，提升光伏发电系统的稳定和耐用性，因而可使部分光伏电站发电效率提升接近 10%，为光伏产业可持续发展带来新的希望。

结论

随着宽禁带半导体器件研究的发展，其在高频电力电

子变换器中的应用越来越多，尤其在改善能量转换性能、减小尺寸以及增强热管理性能方面有着较为突出的优势。宽禁带半导体器件因具有很好的快速响应特性以及耐高温特性，在高温或复杂工作条件下均可呈现出高效的运行表现，而且通过对宽禁带半导体器件的分析发现，其能够有效提升变换器的功率密度以及转换效率，在系统设计过程中则可以提供更大的灵活性。尽管目前尚且存在诸多问题待解决，比如如何进行热量管控、电磁兼容性能、可靠性问题等，然而随着材料技术以及器件设计的进步，宽禁带半导体器件的发展前景是非常值得期待的，尤其是对电动汽车以及可再生能源等领域将产生广泛的应用影响。

参考文献：

- [1] 张洪杰；王宇翔；刘志强 . 基于 SiC 的高频电力电子变换器设计与应用研究 [J]. 电力电子技术 , 2023(7): 45–48.
- [2] 陈俊辉；李博文；高宏杰 . 氮化镓器件在电力电子中的应用及发展趋势 [J]. 电子与电气工程 , 2022(11): 120–124.
- [3] 赵立轩；王文昊；唐晓彤 . 宽禁带半导体材料在高温高频电力变换器中的性能分析 [J]. 电力系统自动化 , 2024(5): 76–80.
- [4] 黄俊涛；林大伟；吴博文 . 宽禁带半导体器件在电力电子变换器中的优势及挑战 [J]. 半导体技术 , 2023(3): 54–59.

作者简介：杨珏（1990.11-），女，大学本科，实验师，主要研究方向为电力电子及电气传动。