Vol. 6, No. 20, Oct-Dec 2026, (1-18)
Journal of New Achievements in Electrical, Computer and Technology (JNAECT)
مجله دستاوردهای نوین در برق،کامپیوتر و فناوری
دوره ۶، شماره ۲۰، پاییز ۱۴۰۵ (۱۸-۱)
journal homepage: https://jnaect.ir



# نقش نیمه‌هادی‌های SiC و GaN در بهبود عملکرد مبدل‌های الکترونیک قدرت

**زهرا عارف دارابی**[۱]

[۱] عضو هیات علمی، مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی، داراب، ایران. zahra.aref@iau.ir

**چکیده**

گسترش مبدل‌های پربازده و با چگالی توان بالا، استفاده از نیمه‌هادی‌های با گاف نواری پهن را به یکی از مسیرهای اصلی توسعه الکترونیک قدرت تبدیل کرده است. این مقاله با رویکردی مروری ـ تحلیلی، ویژگی‌ها، عملکرد و کاربردهای ادوات کاربید سیلیسیم و نیترید گالیم را در مقایسه با فناوری سیلیکون بررسی می‌کند. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که کاربید سیلیسیم به دلیل میدان شکست بالا، هدایت حرارتی مناسب و بلوغ بیشتر در کلاس‌های ولتاژی بالا، برای مبدل‌های پرتوان و کاربردهای کشش و انرژی مناسب‌تر است. در مقابل، نیترید گالیم با قابلیت کلیدزنی سریع، امکان افزایش فرکانس و کاهش حجم اجزای غیرفعال را فراهم می‌کند. با این حال، پارازیت‌های مدار، تداخل الکترومغناطیسی، مدیریت حرارتی، قابلیت اطمینان و هزینه می‌توانند بهره‌برداری از این مزایا را محدود کنند. در مجموع، انتخاب فناوری مناسب باید بر اساس شرایط کاری و طراحی کل مبدل انجام شود.

**واژگان کلیدی:** الکترونیک قدرت، کاربید سیلیسیم، نیترید گالیم، نیمه‌هادی‌های با گاف نواری پهن، مبدل قدرت، چگالی توان، قابلیت اطمینان.

## ۱. مقدمه

در مبدل‌های الکترونیک قدرت، افزایش بازده معمولاً با الزامات دیگری مانند کاهش حجم و وزن، افزایش چگالی توان و کنترل تنش حرارتی همراه است. گسترش خودروهای برقی، سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر، مراکز داده و درایوهای الکتریکی نیز نیاز به مبدل‌هایی با تلفات کمتر و عملکرد مناسب در فرکانس‌های کلیدزنی بالاتر را افزایش داده است. در این میان، ویژگی‌های کلید نیمه‌هادی نقش مهمی در تعیین محدوده عملکرد مبدل دارد. اگرچه فناوری سیلیکون (Si) از بلوغ صنعتی و زیرساخت تولید گسترده‌ای برخوردار است، محدودیت‌هایی نظیر میدان شکست بحرانی نسبتاً پایین و افزایش مقاومت ناحیه رانش در ولتاژهای بالاتر، به‌ویژه در ادوات تک‌قطبی، دستیابی همزمان به بازده بالا و چگالی توان زیاد را دشوار می‌کند. همچنین در فرکانس‌های کلیدزنی بالا، تلفات دینامیکی ادوات سیلیکونی می‌تواند به یکی از عوامل محدودکننده طراحی تبدیل شود [۱]. این محدودیت‌ها زمینه توسعه و به‌کارگیری نیمه‌هادی‌های با گاف نواری پهن را در مبدل‌های الکترونیک قدرت فراهم کرده است.

در میان نیمه‌هادی‌های با گاف نواری پهن [۱] (WBG) ، کاربید سیلیسیم [۲] (SiC) و نیترید گالیم [۳] (GaN) به دلیل بلوغ فناوری و ورود به محصولات تجاری، جایگاه ویژه‌ای در الکترونیک قدرت پیدا کرده‌اند [۲]. میدان شکست بحرانی بالاتر این مواد نسبت به Si امکان طراحی ادواتی با قابلیت انسداد ولتاژ بالا و مقاومت ویژه روشن کمتر را فراهم می‌کند [۱]. بااین‌حال، ویژگی‌های SiCو GaN یکسان نیست و مزایای آنها در شرایط کاری متفاوتی برجسته می‌شود. میدان شکست بالا، هدایت حرارتی مناسب و بلوغ بیشتر ادوات SiC در رده‌های ولتاژی بالاتر، استفاده از این فناوری را در بسیاری از کاربردهای توان و ولتاژ بالا تسهیل کرده است. در مقابل، در ادواتGaN ، ساختار ترانزیستور با تحرک الکترونی بالا(HEMT) [۴] و تشکیل گاز الکترونی دوبعدی (2DEG)در فصل مشترکGaN/AlGaN ، امکان دستیابی به مقاومت روشن پایین و عملکرد کلیدزنی سریع را فراهم می‌کند [۳]. ازاین‌رو، انتخاب میان SiC و GaN را نمی‌توان تنها بر اساس یک مشخصه ماده یا قطعه انجام داد و سطح ولتاژ، توان، فرکانس کلیدزنی و الزامات حرارتی مبدل نیز باید در نظر گرفته شوند.

بااین‌حال، برتری مشخصات ماده یا قطعه لزوماً به همان میزان بهبود در عملکرد مبدل منجر نمی‌شود. افزایش سرعت کلیدزنی می‌تواند تلفات گذار را کاهش دهد، اما هم‌زمان افزایش نرخ تغییرات ولتاژ و جریان، اثر عناصر پارازیتی مدار را تشدید کرده و می‌تواند موجب اضافه‌ولتاژ، نوسانات گذرا و افزایش تداخل الکترومغناطیسی شود. بنابراین، طراحی درایور گیت، مسیر کموتاسیون، بسته‌بندی و چیدمان مدار نقش مهمی در بهره‌برداری از مزایای SiC و GaN دارند [۳]. افزون بر این، محدودیت‌های قابلیت اطمینان در این دو فناوری یکسان نیستند. در ترانزیستور اثر میدان فلز–اکسید–نیمه‌هادی [۵] (MOSFET) مبتنی بر SiC ، پایداری اکسید گیت و تغییر ولتاژ آستانه تحت تنش‌های الکتریکی و حرارتی از مسائل مهم عملکرد بلندمدت به شمار می‌روند [۵، ۴]؛ در حالی که درHEMT هایGaN ، تله‌اندازی بار می‌تواند موجب افزایش مقاومت روشن دینامیکی و در نتیجه افزایش تلفات هدایتی در شرایط واقعی کلیدزنی شود [۷، ۶]. ازاین‌رو، مقایسه این فناوری‌ها تنها بر اساس مشخصاتی مانند مقاومت روشن، بار گیت یا سرعت کلیدزنی برای پیش‌بینی عملکرد آنها در یک مبدل واقعی کافی نیست.

تفاوت ویژگی‌های SiC و GaN در حوزه‌های کاربرد آنها نیز دیده می‌شود .SiC در کاربردهایی مانند اینورترهای کشش خودروهای برقی که به ولتاژ انسداد بالا، توان زیاد و عملکرد حرارتی مناسب نیاز دارند، به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است [۸، ۲]. در مقابل، GaNبیشتر در مبدل‌هایی مورد توجه است که افزایش فرکانس کلیدزنی بتواند به کاهش اندازه اجزای غیرفعال و افزایش چگالی توان منجر شود؛ منابع تغذیه فشرده و برخی مبدل‌های شارژ از جمله این کاربردها هستند [۲]. با وجود مطالعات متعدد در این حوزه، مقایسه مستقیم نتایج گزارش‌شده همواره امکان‌پذیر نیست، زیرا توپولوژی، سطح ولتاژ و

---

[1] - Wide-Bandgap Semiconductor(WBG)
[2] - Silicon Carbide(SiC)
[3]- Gallium Nitride (GaN)
[4] - High-Electron-Mobility Transistor(HEMT)
[5] - Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor(MOSFET)

توان، فرکانس کلیدزنی، شرایط حرارتی و معیارهای ارزیابی در مطالعات مختلف یکسان نیستند. در نتیجه، استنتاج برتری یک فناوری صرفاً از روی مشخصات ماده، داده‌های قطعه یا نتایج یک مطالعه می‌تواند به نتیجه‌گیری ناقص منجر شود. ازاین‌رو، مقاله حاضر با رویکردی مروری ـ تحلیلی، ارتباط میان ویژگی‌های ماده، رفتار قطعه و عملکرد مبدل را در فناوری‌های SiC و GaN بررسی می‌کند. در این بررسی، تلفات و بازده، فرکانس کلیدزنی، چگالی توان و حوزه‌های کاربرد، در کنار عناصر پارازیتی، تداخل الکترومغناطیسی، مدیریت حرارتی، قابلیت اطمینان و هزینه تحلیل می‌شوند تا چارچوبی مقایسه‌ای برای تعیین شرایط حفظ یا محدودشدن مزیت هر فناوری در سطح مبدل ارائه شود.

## ۲. چارچوب نظری و پیشینه پژوهش

چارچوب نظری این مرور بر ارتباط میان سه سطح ویژگی‌های ماده، رفتار قطعه و عملکرد مبدل استوار است. پارامترهایی مانند گاف انرژی، میدان شکست بحرانی، تحرک حامل و هدایت حرارتی، محدوده بالقوه عملکرد ماده را تعیین می‌کنند؛ اما اثر آنها در سطح مبدل از طریق مشخصاتی مانند مقاومت روشن، رفتار کلیدزنی، محدوده حرارتی و تلفات قطعه آشکار می‌شود. بر همین اساس، ابتدا محدودیت‌های اصلی ادوات Si بررسی می‌شود و سپس ویژگی‌های SiC و GaN با تأکید بر چگونگی انتقال مزایا و محدودیت‌های سطح ماده به رفتار قطعه تحلیل می‌شوند. این چارچوب مبنای ارزیابی عملکرد سه فناوری در سطح مبدل در بخش‌های بعد است.

### ۲-۱. محدودیت‌های ادوات سیلیکونی در مبدل‌های الکترونیک قدرت

سیلیکون به دلیل بلوغ فناوری، تنوع ادوات و زیرساخت تولید گسترده همچنان سهم مهمی در مبدل‌های الکترونیک قدرت دارد، اما محدودیت‌های فیزیکی آن با افزایش ولتاژ انسداد آشکارتر می‌شود. در MOSFET سیلیکونی ، افزایش ولتاژ قابل تحمل مستلزم افزایش ضخامت ناحیه رانش و کاهش غلظت ناخالصی آن است؛ در نتیجه مقاومت این ناحیه افزایش می‌یابد و در ولتاژهای بالاتر سهم بیشتری از مقاومت روشن قطعه را تشکیل می‌دهد[۱]. استفاده از ترانزیستور دوقطبی با گیت عایق[۶] (IGBT) در سطوح بالاتر ولتاژ و توان تا حدی این محدودیت هدایتی را کاهش داده است، زیرا تزریق حامل و مدولاسیون رسانندگی می‌تواند افت ولتاژ حالت روشن را در محدوده کاری مناسب نگه دارد. این مزیت بدون هزینه نیست؛ ذخیره حامل‌های اقلیت هنگام هدایت باعث ایجاد جریان دنباله در فرآیند خاموش‌شدن می‌شود و افزایش فرکانس کلیدزنی را با تلفات بیشتری همراه می‌کند[۱]. از دید طراحی مبدل، بنابراین محدودیت Si فقط به یک مشخصه ماده مربوط نیست؛ در عمل، طراح میان کاهش تلفات هدایت در ولتاژهای بالاتر و امکان کار در فرکانس‌های بیشتر با یک مصالحه روبه‌رو است.

افزایش فرکانس کلیدزنی یکی از راه‌های کاهش اندازه سلف، ترانسفورماتور و برخی خازن‌های مورد استفاده در مبدل است، اما امکان افزایش فرکانس را نمی‌توان مستقل از رفتار کلید قدرت در نظر گرفت. درMOSFET های سیلیکونی، بخشی از انرژی در هر سیکل صرف شارژ و تخلیه ظرفیت‌های داخلی و بار گیت می‌شود؛ ازاین‌رو، با افزایش تعداد دفعات کلیدزنی در واحد زمان، سهم این تلفات نیز افزایش می‌یابد. در IGBT مسئله تا حدی متفاوت است و تخلیه حامل‌های ذخیره‌شده هنگام خاموش‌شدن، جریان دنباله و تلفات گذار را تشدید می‌کند[۱]. در نتیجه، افزایش فرکانس الزاماً به مبدلی کوچک‌تر و کارآمدتر منجر نمی‌شود. اگر کاهش حجم اجزای غیرفعال با افزایش تلفات نیمه‌هادی و نیاز بیشتر به دفع حرارت همراه باشد، بخشی از مزیت حاصل از کوچک‌سازی در سطح کل سامانه از دست می‌رود. همین وابستگی میان فرکانس، تلفات و طراحی حرارتی یکی از نقاطی است که تفاوت فناوری Si با ادوات WBG در بخش‌های بعدی اهمیت پیدا می‌کند.

دما نیز در تعیین محدوده عملکرد ادوات سیلیکونی نقش دارد. گاف انرژی کوچک‌تر Si در مقایسه با نیمه‌هادی‌های با گاف نواری پهن، افزایش غلظت حامل‌های ذاتی و جریان نشتی را در دماهای بالا تشدید می‌کند و همین موضوع دامنه عملکرد حرارتی

[6] - Insulated-Gate Bipolar Transistor(IGBT)

قطعه را تحت تأثیر قرار می‌دهد[۱]. البته محدودیت حرارتی قطعه را نباید فقط به گاف انرژی نسبت داد؛ مقاومت حرارتی بسته‌بندی، شرایط خنک‌کاری و نحوه توزیع تلفات نیز دمای پیوند را تعیین می‌کنند. از سوی دیگر، بلوغ فناوریSi ، دسترسی گسترده به قطعات و هزینه پایین‌تر آن باعث شده است استفاده از Si در بسیاری از مبدل‌ها همچنان توجیه فنی و اقتصادی داشته باشد. بنابراین، استفاده از SiC یا GaN زمانی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند که محدودیت‌های ولتاژ، فرکانس، تلفات یا چگالی توان، فضای طراحی قابل دستیابی با ادوات Si را محدود کنند؛ نه صرفاً به این دلیل که خواص ذاتی مواد WBG در برخی شاخص‌ها برتر است.

### ۲-۲. ویژگی‌ها و ساختار ادوات کاربید سیلیسیم

مزیت SiC در ادوات قدرت بیش از آنکه صرفاً از گاف انرژی بزرگ‌تر آن ناشی شود، به مجموعه‌ای از خواص الکتریکی و حرارتی مرتبط است. میدان شکست بحرانی بالاتر SiC امکان دستیابی به ولتاژ انسداد مشخص را با ناحیه رانش نازک‌تر و با مقاومت ویژه کمتر فراهم می‌کند؛ موضوعی که در ادوات قدرت ولتاژ بالا می‌تواند سهم مقاومت ناحیه رانش و در نتیجه تلفات هدایت را کاهش دهد[۹]. این ویژگی از آن جهت اهمیت دارد که همان مصالحه‌ای را هدف قرار می‌دهد که درMOSFET های سیلیکونی با افزایش ولتاژ شدیدتر می‌شود. هدایت حرارتی بالاتر SiC نیز انتقال حرارت درون ساختار نیمه‌هادی را تسهیل می‌کند، اما عملکرد حرارتی مبدل فقط به این مشخصه وابسته نیست. با افزایش چگالی توان، شار حرارتی در سطح کوچک‌تری متمرکز می‌شود و مقاومت حرارتی بسته‌بندی، اتصال تراشه و سامانه خنک‌کاری می‌توانند به عوامل محدودکننده تبدیل شوند. بنابراین، هدایت حرارتی بالاتر SiC ظرفیت بیشتری برای طراحی حرارتی ایجاد می‌کند، ولی به‌خودی‌خود تضمین‌کننده دمای پیوند پایین‌تر نیست.

در میان ادوات قدرت مبتنی برSiC ، MOSFET به یکی از ساختارهای مهم تجاری تبدیل شده است و در کلاس‌های مختلف ولتاژی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹]. با این حال، همهMOSFET های SiC رفتار یکسانی ندارند و معماری سلول می‌تواند بر مقاومت روشن، مشخصات کلیدزنی و تنش الکتریکی اکسید گیت اثر بگذارد. در ساختارهای صفحه‌ای، کانال در امتداد سطح تشکیل می‌شود، در حالی که استفاده از گیت شیاردار امکان تغییر هندسه کانال و افزایش تراکم سلولی را فراهم می‌کند. این تغییر می‌تواند به کاهش برخی مؤلفه‌های مقاومت روشن کمک کند، اما هندسه شیار توزیع میدان الکتریکی در اطراف گیت را نیز تغییر می‌دهد و طراحی اکسید و حفاظت آن را حساس‌تر می‌کند. به همین دلیل، کاهش $R_{DS(on)}$ را نمی‌توان مستقل از قابلیت اطمینان گیت و رفتار قطعه تحت تنش بررسی کرد؛ موضوعی که در طراحی نسل‌های جدیدMOSFET های SiC به یک مصالحه مهم تبدیل شده است[۴].

مزیت الکتریکی SiC زمانی در سطح مبدل محسوس می‌شود که کاهش تلفات قطعه بتواند در شرایط واقعی کلیدزنی حفظ شود. مقاومت روشن کمتر و کاهش انرژی برخی گذارهای کلیدزنی می‌تواند امکان افزایش بازده یا استفاده از فرکانس‌های بالاتر را فراهم کند و در صورت طراحی مناسب، کاهش اندازه بخشی از اجزای غیرفعال نیز امکان‌پذیر می‌شود [۹]. با افزایش سرعت گذارها، در مقابل، اندوکتانس‌های پراکنده مسیر کموتاسیون و مشخصات درایور گیت تأثیر بیشتری بر اضافه‌ولتاژ و نوسان‌های گذرا پیدا می‌کنند. به همین دلیل، بخشی از عملکردی که در مشخصات قطعه برای SiC گزارش می‌شود تنها با طراحی مناسب مدار قدرت، درایور و بسته‌بندی قابل دستیابی است. در عمل، انتخاب فرکانس کلیدزنی باید جایی میان کاهش تلفات و حجم اجزای غیرفعال از یک سو، و افزایش تنش‌های گذرا، تداخل الکترومغناطیسی[۷] EMI و الزامات حرارتی از سوی دیگر انجام شود.

[7] - Electromagnetic Interference (EMI)

### ۲-۳. ساختار و ویژگی‌های ادوات نیترید گالیم

رفتار ادوات قدرت GaN را نمی‌توان تنها از روی گاف انرژی یا میدان شکست این ماده توضیح داد. در بسیاری از این ادوات، ساختار ناهمگون AlGaN/GaN و اختلاف قطبش در فصل مشترک دو لایه، زمینه تشکیل گاز الکترونی دوبعدی (2DEG) را فراهم می‌کند. این کانال رسانا از چگالی حامل و تحرک الکترونی بالایی برخوردار است و یکی از عوامل مؤثر در دستیابی HEMTهای GaN به مقاومت روشن پایین و عملکرد مناسب در کلیدزنی سریع به شمار می‌رود [۳]. از این منظر، تفاوت GaN باMOSFET های متداول Si یا SiC فقط به جنس نیمه‌هادی محدود نیست؛ ساختار کانال، رفتار گیت و مشخصات خازنی قطعه نیز متفاوت‌اند. همین مجموعه ویژگی‌هاست که استفاده از GaN را در مبدل‌هایی با فرکانس کلیدزنی بالا جذاب می‌کند، نه صرفاً مقدار بالاتر یک پارامتر ماده.

تشکیل 2DEG در ساختار متداول GaN/AlGaN یک چالش عملی نیز ایجاد می‌کند، زیرا ساختار پایه HEMT می‌تواند در ولتاژ گیت صفر رسانا باشد؛ حال آنکه در کاربردهای قدرت، رفتار normally-off از نظر کنترل و ایمنی مطلوب‌تر است. یکی از روش‌های رایج برای دستیابی به این حالت، استفاده از لایه p-GaN در ناحیه گیت است که با تغییر شرایط کانال زیر گیت، ایجاد ولتاژ آستانه مثبت را امکان‌پذیر می‌کند. روش‌های دیگری مانند فرورفتگی گیت[8] ، تیمار فلوئوری و ساختار کاسکد نیز برای دستیابی به رفتار normally-off توسعه یافته‌اند [۱۰]. تفاوت این راهکارها تنها به مقدار ولتاژ آستانه محدود نمی‌شود؛ محدوده مجاز تحریک گیت، جریان نشتی، پایداری پارامترها و پیچیدگی ساخت نیز تحت تأثیر معماری گیت قرار می‌گیرند. از دید مبدل، این تفاوت‌ها مستقیماً بر انتخاب درایور گیت، حاشیه‌های ولتاژی و قابلیت اطمینان عملکرد قطعه اثر می‌گذارند.

انتخاب زیرلایه نیز بر هزینه ساخت و رفتار حرارتی ادوات GaN اثر می‌گذارد. رشد GaN روی Si به دلیل هزینه کمتر زیرلایه و سازگاری بیشتر با زیرساخت‌های تولید انبوه مورد توجه قرار گرفته است، هرچند اختلاف شبکه بلوری و ضریب انبساط حرارتی، کنترل تنش و کیفیت لایه‌های رشدیافته را دشوارتر می‌کند. زیرلایه SiC از نظر انتقال حرارت و برخی ملاحظات رشد مزایایی دارد، اما هزینه بالاتر آن یک محدودیت عملی است[۱۰]. در هر دو حالت، دمای کانال را نمی‌توان تنها براساس هدایت حرارتی GaN پیش‌بینی کرد. گرمای ایجادشده باید از لایه‌های فعال و بافر، زیرلایه، اتصالات و بسته‌بندی عبور کند؛ بنابراین ممکن است با کوچک‌ترشدن تراشه و افزایش چگالی توان، مسیر دفع حرارت پیش از خود ماده به عامل محدودکننده تبدیل شود.

ساختار لایه‌ای GaN در کنار مزایای آن، منشأ برخی رفتارهای دینامیکی نیز هست که در مشخصات ایستای قطعه به‌سادگی دیده نمی‌شوند. تله‌های موجود در سطح یا لایه‌های بافر می‌توانند در زمان اعمال تنش ولتاژی در حالت خاموش، حامل‌ها را به دام بیندازند. پس از روشن‌شدن قطعه، آزادسازی این بارها ممکن است با تأخیر انجام شود و مقاومت روشن اندازه‌گیری‌شده در شرایط دینامیکی از مقدار ایستای آن بیشتر باشد؛ پدیده‌ای که معمولاً با عنوان افزایش مقاومت روشن دینامیکی شناخته می‌شود[۶]. اهمیت این رفتار در سطح مبدل از آنجا ناشی می‌شود که افزایش $R_{DS(on)}$ مستقیماً تلفات هدایت را تغییر می‌دهد و در نتیجه بخشی از مزیتی که براساس مقدار اسمی مقاومت روشن انتظار می‌رود، ممکن است در شرایط واقعی کلیدزنی کاهش یابد. شدت این اثر به ساختار قطعه و شرایط تنش وابسته است و به همین دلیل طراحی بافر، صفحات میدان و غیرفعال‌سازی سطح همچنان از موضوعات مهم توسعه ادوات GaN هستند[۱۰].

در مجموع، ظرفیت GaN برای کار در فرکانس‌های بالا حاصل برهم‌کنش خواص ماده با معماریHEMT ، ساختار گیت و مشخصات خازنی قطعه است. در مقابل، تله‌های بار، محدودیت‌های حرارتی و حساسیت درایور و مدار به گذارهای سریع می‌توانند بخشی از این مزیت را در شرایط واقعی کاهش دهند. ساختارهای جانبی GaN در ادوات قدرت تجاری جایگاه مهمی دارند، در حالی که ساختارهای عمودی نیز با هدف گسترش قابلیت این فناوری به رده‌های ولتاژی بالاتر مورد پژوهش قرار گرفته‌اند [۱۰]. بنابراین، مقایسه GaN و SiC نباید به پارامترهای منفرد ماده محدود شود؛ معیار نهایی، میزان تبدیل مزیت‌های سطح ماده و قطعه به کاهش تلفات، افزایش فرکانس قابل استفاده و بهبود عملکرد حرارتی و حجمی مبدل در شرایط کاری مشخص است.

[8] - gate recess

### ۳. روش مرور منابع

مقاله حاضر با رویکردی مروری ـ تحلیلی تدوین شده است و هدف آن، بررسی تطبیقی فناوری‌های SiC و GaN از سطح ویژگی‌های ماده و ساختار قطعه تا پیامدهای آنها در عملکرد مبدل‌های الکترونیک قدرت است. جست‌وجوی منابع با استفاده از Google Scholarو جست‌وجوی مستقیم در وبگاه ناشران علمی مرتبط انجام شد و تمرکز اصلی بر مطالعات منتشرشده در بازه ۲۰۲۳ تا ۲۰۲۶ قرار گرفت تا تحولات اخیر فناوری، قابلیت اطمینان و کاربردهای عملی این ادوات پوشش داده شود. در جست‌وجو از ترکیب کلیدواژه‌هایی مانند SiC power MOSFET، GaN power HEMT، wide-bandgap power converters، switching losses، power density، gate driver، EMI، thermal management و reliability استفاده شد. برای پوشش کاربردهای مبدلی نیز کلیدواژه‌های مرتبط با electric vehicle، traction inverter، on-board charger، photovoltaic converter و data center power supplyبه جست‌وجو افزوده شدند.

معیار اصلی انتخاب منابع، ارتباط مستقیم آنها با ادوات قدرت SiC و GaN و قابلیت استفاده از نتایج در تحلیل عملکرد مبدل بود. اولویت با مقالات داوری‌شده‌ای قرار گرفت که حداقل یکی از محورهای خواص و ساختار قطعه، تلفات هدایت و کلیدزنی، رفتار حرارتی، عناصر پارازیتی وEMI ، قابلیت اطمینان یا عملکرد در مبدل‌های واقعی را بررسی کرده بودند. در موضوعاتی که ارزیابی عملکرد عملی اهمیت بیشتری داشت، مطالعات پژوهشی و تجربی، از جمله پژوهش‌های مربوط به پایداری اکسید گیت درMOSFET هایSiC ، مقاومت روشن دینامیکی درHEMT های GaN و عملکرد مبدل‌ها در کاربردهای خودرو برقی، شارژ، فتوولتائیک و منابع تغذیه، در اولویت قرار گرفتند. مقالات مروری جدید نیز برای شناسایی روندهای فناوری و مقایسه نتایج مطالعات متعدد استفاده شدند. در مقابل، منابعی که ارتباط مستقیمی با ادوات قدرت یا مبدل‌های الکترونیک قدرت نداشتند، یا شواهد کافی برای پشتیبانی از موضوع مورد بررسی ارائه نمی‌کردند، در تحلیل اصلی وارد نشدند.

پس از انتخاب منابع، شواهد در چهار سطح شامل ویژگی‌های ماده، ساختار و رفتار قطعه، عملکرد مبدل و الزامات طراحی سامانه سازمان‌دهی و تحلیل شدند. در سطح قطعه، پارامترهایی مانند ولتاژ انسداد، مقاومت روشن، رفتار کلیدزنی و محدودیت‌های حرارتی و قابلیت اطمینان بررسی شدند و سپس اثر آنها بر تلفات، بازده، فرکانس کلیدزنی، چگالی توان و عملکرد حرارتی مبدل مورد توجه قرار گرفت. برای کاهش احتمال نتیجه‌گیری نامعتبر از مقایسه مطالعات ناهمگون، نتایج با توجه به شرایط گزارش‌شده در هر مطالعه، از جمله سطح ولتاژ و توان، فرکانس کاری، ساختار مبدل و شرایط حرارتی، تفسیر شدند. همچنین، طراحی درایور گیت، عناصر پارازیتی، EMI، بسته‌بندی و مدیریت حرارتی به‌عنوان عواملی در نظر گرفته شدند که می‌توانند فاصله میان ظرفیت بالقوه قطعه و عملکرد قابل دستیابی در مبدل واقعی را تعیین کنند. بر این اساس، تحلیل نهایی بر شناسایی شرایطی متمرکز شد که در آنها مزیت هر فناوری در سطح مبدل حفظ می‌شود یا تحت تأثیر محدودیت‌های طراحی کاهش می‌یابد.

### ۴. مقایسه ویژگی‌های سیلیکون، SiC و GaN در کاربردهای قدرت

مقایسه نیمه‌هادی‌های قدرت زمانی از دید طراحی مبدل معنا پیدا می‌کند که خواص ماده به رفتار قطعه و سپس به پیامدهای آن در سطح مبدل مرتبط شوند. گاف انرژی، میدان شکست بحرانی، تحرک حامل‌ها، سرعت اشباع و هدایت حرارتی از جمله پارامترهایی هستند که محدوده بالقوه عملکرد هر فناوری را تعیین می‌کنند؛ با این حال، مقدار این پارامترها به‌تنهایی برای پیش‌بینی عملکرد یک قطعه تجاری کافی نیست. ساختار قطعه، کیفیت فصل مشترک، فناوری ساخت، بسته‌بندی و شرایط کاری می‌توانند فاصله قابل‌توجهی میان حد نظری ماده و عملکرد واقعی ایجاد کنند. ازاین‌رو، جدول (۱) خواص پایه را به‌عنوان مبنای مقایسه نشان می‌دهد و تفسیر آنها در ادامه با تأکید بر اثرشان بر طراحی مبدل انجام می‌شود.

یکی از مهم‌ترین تفاوت‌ها به میدان شکست بحرانی مربوط است. برای ناحیه رانش یک قطعه تک‌قطبی ایده‌آل و در تقریب یک‌بعدی، مقاومت ویژه حالت روشن با مربع ولتاژ شکست افزایش می‌یابد و با توان سوم میدان شکست بحرانی رابطه معکوس دارد. حد نظری این ارتباط را می‌توان به‌صورت رابطه (۱) بیان کرد:

$$R_{on,sp} = 4V_B^2 / (\varepsilon_s \mu_n E_c^3) \quad (۱)$$

که در آن $R_{on,sp}$ مقاومت ویژه حالت روشن ناحیه رانش، $V_B$ ولتاژ شکست، $\varepsilon_s$گذردهی الکتریکی نیمه‌هادی، $\mu_n$ تحرک الکترون و $E_c$ میدان شکست بحرانی است. این رابطه بیانگر یک حد نظری برای ناحیه رانش در ادوات تک‌قطبی است و مقاومت روشن کل یک قطعه تجاری را، که مؤلفه‌های دیگری نیز در آن سهم دارند، مستقیماً پیش‌بینی نمی‌کند. میدان شکست بالاتر در 4H-SiC و GaN اجازه می‌دهد برای تحمل یک ولتاژ مشخص، ناحیه تحمل‌کننده ولتاژ با ابعاد مؤثر کوچک‌تری طراحی شود؛ در نتیجه سهم این ناحیه در مقاومت حالت روشن می‌تواند نسبت به سیلیکون کاهش یابد [۸].

از نظر حرارتی، 4H-SiC در مقایسه با Si و GaN از هدایت حرارتی بالاتری برخوردار است و از این جهت ظرفیت بیشتری برای انتقال گرما درون ماده فراهم می‌کند. در مقابل، درGaN ، ترکیب ویژگی‌های انتقال حامل با ساختار HEMT و کانال 2DEG ظرفیت مناسبی برای گذارهای سریع و کار در فرکانس‌های کلیدزنی بالاتر ایجاد می‌کند. بااین‌حال، این ویژگی‌ها به معنای برتری مطلق هیچ‌یک از دو فناوری نیستند؛ عملکرد حرارتی نهایی به مسیر انتقال گرما، زیرلایه و بسته‌بندی وابسته است و بهره‌برداری از سرعت کلیدزنی بالاتر نیز به طراحی درایور گیت و کنترل عناصر پارازیتی بستگی دارد [۶، ۴]. ازاین‌رو، خواص ماده باید به‌عنوان ظرفیت بالقوه فناوری تفسیر شوند و نه به‌عنوان تضمین عملکرد بهتر در سطح مبدل.

لازم به ذکر است که مقادیر خواص فیزیکی گزارش‌شده برایSi ، 4H-SiC و GaN در منابع مختلف می‌توانند تحت تأثیر عواملی مانند دما، کیفیت بلور، غلظت ناخالصی، جهت بلوری و ساختار قطعه تغییر کنند. این موضوع به‌ویژه در مورد تحرک الکترون در GaN اهمیت دارد، زیرا مقدار آن به ویژگی‌های ماده و، در ساختارهایHEMT ، به مشخصات کانال 2DEG وابسته است. ازاین‌رو، مقادیر ارائه‌شده در جدول ۱ به‌عنوان بازه‌های شاخص برای مقایسه کیفی فناوری‌ها در نظر گرفته شده‌اند و نباید معادل مشخصات ثابت یک قطعه تجاری تلقی شوند.

**جدول ۱- مقایسه مقادیر شاخص برخی خواص فیزیکیSi ، 4H-SiC و GaN در دمای اتاق**

| ویژگی و نماد | واحد | Si | 4H-SiC | GaN | منبع |
|---|---|---|---|---|---|
| گاف انرژی( Eg) | eV | ۱,۱۲ | ۳,۲۶ | ۳,۴۵–۳,۴۰ | [۱،۴،۸] |
| میدان شکست بحرانی (Ec) | MV/cm | حدود ۰,۳ | حدود ۳,۰–۲,۲ | حدود ۳,۳–۳,۰ | [۱،۴،۸] |
| هدایت حرارتی (k) | W/(cm·K) | حدود ۱,۵–۱,۳ | حدود ۴,۹–۳,۶ | حدود ۲,۳–۱,۳ | [۴،۸،۹] |
| تحرک الکترون (μn) | cm²/(V·s) | حدود ۱۲۰۰– ۱۵۰۰ | حدود ۹۵۰–۸۰۰ | حدود ۲۰۰۰–۱۰۰۰ | [۴،۸] |
| سرعت اشباع الکترون، (vsat) | $10^7$ cm/s | حدود ۱,۰ | حدود ۲,۲–۲,۰ | حدود ۲,۵–۲,۲ | [۱،۴،۸] |

برآیند مقایسه جدول ۱ نشان می‌دهد که تفاوت میان این سه فناوری را نباید به یک شاخص منفرد فروکاست. میدان شکست و هدایت حرارتی بالاتر 4H-SiC آن را برای بسیاری از کاربردهای ولتاژ و توان بالا مناسب می‌کند، در حالی که ویژگی‌های انتقال حامل و ساختار HEMT در GaN ظرفیت بالایی برای کلیدزنی سریع و افزایش فرکانس ایجاد می‌کنند. در مقابل، سیلیکون با وجود محدودیت‌های ماده‌ای، از مزیت بلوغ فناوری و زیرساخت ساخت برخوردار است. از دید مبدل، اهمیت این تفاوت‌ها زمانی آشکار می‌شود که به تلفات هدایت و کلیدزنی، فرکانس قابل استفاده، اندازه اجزای غیرفعال، چگالی توان و الزامات حرارتی تبدیل شوند. این ارتباط در بخش بعد بررسی می‌شود.

## ۵. تأثیر SiC و GaN بر عملکرد مبدل‌های الکترونیک قدرت

پس از مقایسه خواص مواد و رفتار ادوات، ارزیابی اصلی باید در سطح مبدل انجام شود؛ زیرا مزیت یک نیمه‌هادی زمانی ارزش عملی پیدا می‌کند که به کاهش تلفات، افزایش بازده، امکان افزایش فرکانس کلیدزنی یا کاهش حجم و وزن سامانه منجر شود. این پیامدها مستقل از یکدیگر نیستند. افزایش فرکانس، برای مثال، می‌تواند اندازه برخی اجزای غیرفعال را کاهش دهد، اما هم‌زمان حساسیت مدار را به عناصر پارازیتی، تنش‌های گذرا و تداخل الکترومغناطیسی افزایش می‌دهد. ازاین‌رو، مقایسه SiC و GaN در این بخش بر ارتباط میان تلفات قطعه، فرکانس کلیدزنی، بازده، چگالی توان و الزامات حرارتی متمرکز است؛ مجموعه‌ای از معیارهای به هم پیوسته که در ارزیابی مبدل‌های مبتنی بر نیمه‌هادی‌های با گاف نواری پهن اهمیت دارند[۱۱].

### ۵-۱. تلفات و بازده تبدیل

برای تفکیک اثر فناوری نیمه‌هادی، می‌توان در یک تقریب اولیه تلفات قطعه قدرت را به دو مؤلفه اصلی هدایت و کلیدزنی تقسیم کرد. با صرف‌نظرکردن از تلفات درایور گیت، اجزای مغناطیسی، خازن‌ها، اتصالات و سایر تلفات جانبی مبدل، تلفات متوسط یک کلید قدرت را می‌توان به‌صورت رابطه (۲) نوشت:

$$P_{dev} \approx P_{cond} + P_{sw} \qquad (۲)$$

در رابطه (۲)، $P_{dev}$ تلفات متوسط قطعه قدرت، $P_{cond}$ تلفات هدایت و $P_{sw}$ تلفات کلیدزنی است. این رابطه برای تفکیک سهم اصلی تلفات نیمه‌هادی به کار می‌رود و نباید با تلفات کل مبدل یکسان در نظر گرفته شود.

برای یک کلید اثر میدان، اگر $I_{rms,sw}$ جریان مؤثر عبوری از همان کلید در چرخه کاری مورد بررسی باشد، مؤلفه هدایت در تقریب متداول از رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$P_{cond} = I_{rms,sw}^2 \, R_{DS(on)} \qquad (۳)$$

در رابطه (۳)، $I_{rms,sw}$ جریان مؤثر کلید و $R_{DS(on)}$ مقاومت حالت روشن آن در شرایط کاری مورد نظر است. این رابطه یک تقریب متداول برای برآورد تلفات هدایت است و دقت آن به استفاده از مقدار واقعی مقاومت روشن در نقطه کاری بستگی دارد. از آنجا که $R_{DS(on)}$ با دمای پیوند و شرایط بایاس تغییر می‌کند، استفاده از مقدار نامی دیتاشیت می‌تواند تلفات هدایت را کمتر از مقدار واقعی برآورد کند. در ادوات GaN نیز افزایش مقاومت روشن دینامیکی ناشی از تله‌اندازی بار می‌تواند سبب شود مقاومت مؤثر در شرایط کلیدزنی از مقدار ایستای گزارش‌شده بیشتر باشد[۶،۷]. مؤلفه کلیدزنی به انرژی تلف‌شده در هر گذار و تعداد تکرار گذارها در واحد زمان وابسته است. اگر انرژی روشن‌شدن و خاموش‌شدن قطعه در نقطه کاری مشخص معلوم باشد، تلفات متوسط کلیدزنی را می‌توان مطابق رابطه (۴) تقریب زد:

$$P_{sw} = f_{sw} \, (E_{on} + E_{off}) \qquad (۴)$$

در رابطه (۴)، $f_{sw}$ فرکانس کلیدزنی و $E_{on}$ و $E_{off}$ به‌ترتیب انرژی تلف‌شده در فرایند روشن‌شدن و خاموش‌شدن قطعه هستند. این رابطه زمانی کاربرد مستقیم‌تری دارد که انرژی‌های کلیدزنی در شرایط کاری مشخص در دسترس باشند. مقادیر $E_{on}$ و $E_{off}$ ثابت ذاتی فناوری نیستند و به ولتاژ و جریان کلیدزنی، دمای پیوند، شرایط درایو گیت، عناصر پارازیتی و مدار آزمون وابسته‌اند. در توپولوژی‌های دارای کلیدزنی نرم نیز مقدار این انرژی‌ها می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی با شرایط کلیدزنی سخت متفاوت باشد. بنابراین، مقایسه تلفات کلیدزنی ادوات مختلف تنها زمانی قابل اتکاتر است که شرایط آزمون و نوع کموتاسیون تا حد امکان مشابه باشند.

روابط (۳) و (۴) نشان می‌دهند که کاهش مقاومت روشن به‌تنهایی تضمین‌کننده کاهش تلفات کل نیست. قطعه‌ای که از نظر تلفات هدایت مناسب است، اگر انرژی کلیدزنی بالاتری داشته باشد، ممکن است با افزایش فرکانس بخشی از مزیت خود را از دست بدهد. بوفولو و همکاران [۲] در مقایسه مجموعه‌ای از ترانزیستورهای تجاری کلاس ۶۵۰ ولت نشان داده‌اند که HEMTهای

GaN نوع افزایشی در برخی شاخص‌های دینامیکی، از جمله حاصل‌ضرب $R_{DS(on)}$ $Q_G$ و ظرفیت ورودی، مقادیر پایین‌تری نسبت به نمونه‌های مورد بررسی Si و SiC داشته‌اند. این نتیجه ظرفیت GaN برای کلیدزنی سریع را نشان می‌دهد، اما به همان مجموعه قطعات و شرایط مقایسه مربوط است و نباید به همه ادوات تعمیم داده شود.

در مبدل‌های مبتنی بر SiC نیز کاهش تلفات فقط به انتخاب کلید محدود نیست. رسول و همکاران [۱۲] نشان داده‌اند که عملکرد مبدل‌های SiC به طراحی درایور، مسیر کموتاسیون، اندوکتانس‌های پراکنده و آرایش مدار وابستگی زیادی دارد. در نتیجه، کاهش انرژی کلیدزنی که در سطح قطعه امکان‌پذیر است تنها زمانی در سطح مبدل حفظ می‌شود که اضافه‌ولتاژ و نوسان‌های ناشی از گذارهای سریع به‌درستی کنترل شوند.

اثر نهایی مجموعه تلفات در بازده مبدل ظاهر می‌شود. اگر توان ورودی برابر مجموع توان خروجی و تلفات کل مبدل در نظر گرفته شود، بازده تبدیل مطابق رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$\eta = P_{out} / P_{in} \times 100 = P_{out} / (P_{out} + P_{loss}) \times 100 \qquad (۵)$$

در رابطه (۵)، $\eta$ بازده تبدیل برحسب درصد، $P_{in}$ توان ورودی، $P_{out}$ توان خروجی و $P_{loss}$ مجموع تلفات مبدل است. اهمیت کاهش تلفات با افزایش سطح توان بیشتر می‌شود؛ زیرا حتی بهبود محدود بازده می‌تواند توان حرارتی دفع‌شونده را کاهش دهد و بر اندازه و ظرفیت سامانه خنک‌کاری اثر بگذارد. ازاین‌رو، ارزیابی بازده باید همراه با نقطه کاری، سطح بار و شرایط حرارتی گزارش شود، نه صرفاً براساس بیشینه بازده ثبت‌شده.

### ۵-۲. فرکانس کلیدزنی و اجزای غیرفعال

افزایش فرکانس کلیدزنی زمانی به یک مزیت سامانه‌ای تبدیل می‌شود که امکان کاهش اندازه سلف‌ها، ترانسفورماتورها و بخشی از خازن‌های فیلتر را فراهم کند. بوفولو و همکاران [۲] این ارتباط را یکی از مسیرهای اصلی افزایش چگالی توان در مبدل‌های مبتنی بر ادوات WBG می‌دانند. سومرو و همکاران [۸] نیز در کاربردهای کشش نشان داده‌اند که استفاده از ادوات سریع‌تر می‌تواند فضای طراحی لازم برای کاهش اندازه اجزای فیلتر را گسترش دهد. بااین‌حال، میزان کوچک‌سازی فقط تابع فرکانس نیست و به توپولوژی، سطح ریپل مجاز، ماده هسته، تلفات مغناطیسی و الزامات حرارتی نیز وابسته است.

افزایش فرکانس کلیدزنی، تعداد گذارها در واحد زمان و، در صورت ثابت‌بودن انرژی هر گذار، تلفات کلیدزنی را افزایش می‌دهد. مستقل از فرکانس، کوتاه‌ترشدن زمان گذار و افزایش نرخ‌های dv/dt و di/dt می‌تواند اثر اندوکتانس‌ها و ظرفیت‌های پارازیتی را تشدید کند و به اضافه‌ولتاژ، نوسان، جریان‌های مد مشترک و افزایش تداخل الکترومغناطیسی منجر شود.

مرور لی و همکاران [۱۳] نشان می‌دهد که در مبدل‌های مبتنی بر ادوات WBG، کاهش EMI به کنترل مسیرهای کموتاسیون، طراحی چیدمان، فیلترگذاری و تنظیم سرعت کلیدزنی وابسته است. آوراهام و همکاران [۳] نیز حساسیت بیشتر SiC و GaN به پارازیت‌های بسته‌بندی و مدار را در گذارهای سریع از چالش‌های اصلی بهره‌برداری از این ادوات می‌دانند.

بنابراین، فرکانس بهینه الزاماً بیشترین فرکانسی نیست که قطعه قادر به کلیدزنی در آن است. نقطه مناسب جایی قرار می‌گیرد که کاهش اندازه اجزای غیرفعال و تلفات کلیدزنی قابل قبول، با افزایش تلفات وابسته به فرکانس، EMI، تنش‌های گذرا و محدودیت‌های حرارتی متعادل شود. این موازنه در GaN، که ظرفیت کار در فرکانس‌های بالاتر دارد، اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند؛ زیرا اگر طراحی برد، درایور و فیلتر متناسب با سرعت قطعه نباشد، بخشی از مزیت حاصل از کلیدزنی سریع در سطح سامانه از بین می‌رود.

### ۵-۳. چگالی توان و مدیریت حرارتی

کاهش تلفات و کوچک‌شدن اجزای غیرفعال در نهایت می‌توانند به افزایش چگالی توان مبدل منجر شوند. اگر چگالی توان حجمی به‌صورت نسبت توان خروجی نامی به حجم اشغال‌شده توسط مبدل تعریف شود، رابطه (۶) قابل استفاده است:

$$\rho_P = P_{out} / V_{conv} \quad (۶)$$

در رابطه (۶)، $\rho_P$ چگالی توان حجمی، $P_{out}$ توان خروجی و $V_{conv}$ حجم مبدل است. واحد این شاخص باید متناسب با مقیاس سامانه، برای مثال $W/cm^3$ یا kW/L، به‌صراحت گزارش شود. همچنین، مرز فیزیکی مورد استفاده برای تعیین حجم باید مشخص باشد؛ زیرا مقایسه چگالی توان دو مبدل زمانی معتبر است که اجزای منظورشده در محاسبه حجم، مانند فیلترها، اجزای مغناطیسی و سامانه خنک‌کاری، تعریف یکسان یا دست‌کم قابل مقایسه‌ای داشته باشند.

افزایش چگالی توان تنها حاصل کوچک‌شدن قطعات نیست. با فشرده‌ترشدن مبدل، توان تلف‌شده در حجم کوچک‌تری متمرکز می‌شود و در نتیجه طراحی مسیر حرارتی، بسته‌بندی، اتصال تراشه، زیرلایه و سامانه خنک‌کاری اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. کین و همکاران [۱۴] نشان داده‌اند که بهره‌برداری مؤثر از ظرفیت ادوات WBG به توسعه هم‌زمان طراحی الکتریکی، بسته‌بندی و مدیریت حرارتی وابسته است. هدایت حرارتی بالاتر SiC انتقال گرما در ماده را تسهیل می‌کند، اما به‌تنهایی مانع ایجاد نقاط داغ موضعی در توان‌های بالا نمی‌شود. در ادوات جانبی GaN نیز مسیر انتقال گرما از ناحیه کانال به زیرلایه و بسته‌بندی می‌تواند یکی از عوامل محدودکننده عملکرد حرارتی باشد.

در نتیجه، افزایش چگالی توان باید حاصل طراحی هم‌زمان بخش الکتریکی، حرارتی و مکانیکی باشد، نه صرفاً جایگزینی یک کلید سیلیکونی با SiC یا GaN. بسته‌بندی کم‌اندوکتانس، کوتاه‌کردن حلقه‌های کموتاسیون و کاهش مقاومت حرارتی می‌توانند به حفظ مزایای کلیدزنی سریع در سطح مبدل کمک کنند[۲،۱۴]. از دید انتخاب فناوری، SiC در نقاط کاری با ولتاژ، توان و بار حرارتی بالاتر فضای طراحی مناسبی فراهم می‌کند، در حالی که GaN در مبدل‌هایی که افزایش فرکانس بتواند مستقیماً به کوچک‌سازی اجزای غیرفعال و افزایش چگالی توان منجر شود، ظرفیت بیشتری نشان می‌دهد. بااین‌حال، مقدار این مزیت به شرایط واقعی مبدل وابسته است؛ موضوعی که در بخش بعد با بررسی کاربردهای عملی دو فناوری دنبال می‌شود.

## ۶. کاربردهای عملی SiC و GaN در مبدل‌های الکترونیک قدرت

کاربرد عملی نیمه‌هادی‌های با گاف نواری پهن را نمی‌توان صرفاً از روی مشخصات ماده یا قطعه تعیین کرد؛ سطح ولتاژ، توان نامی، فرکانس کلیدزنی، محدودیت حجم و الزامات حرارتی مشخص می‌کنند که مزیت هر فناوری تا چه اندازه در سطح سامانه قابل استفاده باشد. بررسی‌های صنعتی نشان می‌دهند که SiC در بسیاری از سامانه‌های پرتوان و ولتاژ بالاتر جایگاه تثبیت‌شده‌تری یافته است، در حالی که GaN بیشتر در مبدل‌هایی مورد توجه قرار می‌گیرد که کلیدزنی سریع و کوچک‌سازی اجزای غیرفعال نقش تعیین‌کننده دارند [۲]. این تمایز به معنای مرزبندی مطلق میان دو فناوری نیست؛ در برخی کاربردها، توپولوژی و معماری سامانه می‌توانند محدوده استفاده از هر دو را تغییر دهند.

### ۶-۱. خودروهای برقی و سامانه‌های شارژ

در شارژر روی‌برد[9](OBC) ، شرایط انتخاب فناوری تا حدی متفاوت است. در این سامانه، افزایش فرکانس کلیدزنی می‌تواند امکان کاهش اندازه اجزای مغناطیسی و فیلترها را فراهم کند و از این جهت قابلیت کلیدزنی سریع GaN اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. رئالی و همکاران [۱۵] یک شارژر روی‌برد دوسویه مبتنی بر GaN با توان ۶٫۶ کیلووات و محدوده ولتاژ خروجی ۲۰۰ تا ۴۵۰ ولت، همراه با مبدل کمکی یک کیلوواتی و ۱۲ ولتی، توسعه داده‌اند. برای نمونه اولیه، بازده ۹۶ درصد و چگالی توان ۲٫۲ کیلووات بر لیتر با احتساب سامانه خنک‌کاری، در دمای محیط ۶۰ درجه سلسیوس گزارش شده است. این نتیجه، امکان دستیابی به عملکرد مناسب در یک سامانه فشرده مبتنی بر GaN را نشان می‌دهد؛ بااین‌حال، حاصل طراحی مجموعه مبدل و خنک‌کاری است و به‌تنهایی برتری GaN بر فناوری‌های دیگر را اثبات نمی‌کند. ناراسیپورام و موپیدوی [۱۶] نیز فناوری GaN حالت

[9] - On-Board Charger (OBC)

افزایشی[10] (E-mode) را در یک مبدل تشدیدی[11] DC-DC برای کاربرد شارژ خودرو بررسی کرده‌اند و بر ضرورت ارزیابی تلفات عملی در کنار مشخصات اسمی قطعه تأکید کرده‌اند.

در مجموع، در مسیرهای اصلی انتقال توان خودروهای با ولتاژ و توان بالاتر، SiC به دلیل بلوغ بیشتر و دسترس‌پذیری گسترده‌تر در رده‌های ولتاژی مناسب، کاربرد بیشتری یافته است [۲، ۸]. در مقابل، GaNدر بخش‌هایی که افزایش فرکانس کلیدزنی بتواند به کاهش حجم اجزای غیرفعال و افزایش چگالی توان منجر شود، ظرفیت قابل توجهی دارد [۲]. بنابراین، انتخاب میان این دو فناوری باید با توجه به محل مبدل در معماری خودرو، سطح ولتاژ و توان، فرکانس کاری و محدودیت‌های EMI و حرارتی انجام شود و نمی‌توان آن را صرفاً بر اساس سرعت کلیدزنی یا مقاومت روشن تعیین کرد.

### ۶-۲. سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر و شبکه برق

در سامانه‌های فتوولتائیک، انرژی تولیدشده پیش از تحویل به بار یا شبکه معمولاً یک یا چند مرحله تبدیل توان را طی می‌کند؛ ازاین‌رو، کاهش تلفات هر مرحله می‌تواند بر بازده کل سامانه اثر بگذارد. پارک و همکاران [۱۷] در مرور نیمه‌هادی‌های قدرت مورد استفاده در سامانه‌های فتوولتائیک، SiC و GaN را از گزینه‌های مهم برای ارتقای عملکرد مبدل‌های این حوزه معرفی کرده‌اند. بااین‌حال، نقش دو فناوری یکسان نیست: در ساختارهایی با سطح ولتاژ و توان بالاتر، قابلیت بلوکه‌کردن ولتاژ و رفتار حرارتی SiC اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، در حالی که در مبدل‌های کوچک‌تر یا طبقات با فرکانس بالاتر، مزیت کلیدزنی سریع GaN می‌تواند در کاهش حجم اجزای غیرفعال مؤثرتر باشد.

چاکرابورتی و همکاران [۱۸] عملکرد یک مبدل فتوولتائیک با توان نامی ۵ کیلووات را در دو ساختار هیبریدی و تمام SiC مقایسه کرده‌اند. مطابق جدول نتایج اندازه‌گیری، در ولتاژ ورودی نزدیک به ۸۰۰ ولت و توان خروجی حدود ۳٫۵ کیلووات، بازده ساختار هیبریدی ۹۷٫۹۶ درصد و بازده ساختار تمام SiC برابر ۹۹٫۰۴ درصد بوده است؛ تلفات متناظر نیز به‌ترتیب حدود ۷۲٫۷ و ۳۴٫۱ وات گزارش شده‌اند. این مقایسه، کاهش تلفات در ساختار تمام SiCرا برای نقاط کاری گزارش‌شده نشان می‌دهد، اما تعمیم آن به سایر مبدل‌ها مستلزم توجه به توپولوژی، قطعات و شرایط آزمون است. بنابراین، در ارزیابی کاربردهای فتوولتائیک، منحنی بازده و توزیع تلفات در نقاط مختلف بار باید در کنار بیشینه بازده بررسی شوند.

با افزایش سطح ولتاژ به کاربردهای شبکه‌ای و سامانه‌های پرتوان، دامنه استفاده از SiC گسترده‌تر می‌شود. بوفولو و همکاران [۲] کاربردهای شبکه هوشمند، انرژی بادی و کشش الکتریکی را از حوزه‌های توسعه ادوات SiC در سطوح ولتاژی بالاتر معرفی کرده‌اند. بااین‌حال، مزیت بالقوه ماده زمانی در سطح شبکه حفظ می‌شود که بسته‌بندی، عایق‌بندی، طراحی حرارتی و حفاظت مبدل نیز متناسب با سرعت و سطح ولتاژ ادوات جدید بازطراحی شوند. در نتیجه، گذار از سیلیکون به نیمه‌هادی‌های با گاف نواری پهن در این حوزه بیشتر یک تغییر در طراحی سامانه است تا جایگزینی مستقیم یک کلید با کلیدی دیگر.

### ۶-۳. منابع تغذیه، مراکز داده و تجهیزات الکترونیکی

در منابع تغذیه فشرده، محدودیت حجم و وزن معمولاً اهمیت بیشتری نسبت به کاربردهای شبکه‌ای دارد و به همین دلیل افزایش فرکانس کلیدزنی می‌تواند ارزش طراحی بالایی ایجاد کند. GaN به دلیل ویژگی‌های دینامیکی مناسب و امکان کار در فرکانس‌های بالاتر، در شارژرهای فشرده و منابع تغذیه تجهیزات الکترونیکی مورد استفاده قرار گرفته است. بوفولو و همکاران[۲] کاربرد تجاری GaN را در منابع تغذیه تجهیزات مصرفی گزارش کرده‌اند؛ با این قید که کوچک‌سازی واقعی مبدل زمانی حاصل می‌شود که طراحی مغناطیسی، مسیرهای جریان، درایور گیت و فیلتر EMI نیز با فرکانس بالاتر سازگار شوند.

همین ملاحظات در مراکز داده اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند، زیرا تعداد زیاد منابع تغذیه و کارکرد پیوسته سبب می‌شود تلفات تبدیل علاوه بر مصرف مستقیم انرژی، بر بار سامانه سرمایش نیز اثر بگذارد. تسای و همکاران [۱۹] در تحلیل مقایسه‌ای ادوات

[10] - Enhancement Mode (E-mode)
[11] - Direct Current–Direct Current (DC–DC)

قدرت برای واحدهای منبع تغذیه سرورهای هوش مصنوعی، انتخاب فناوری نیمه‌هادی را در سطح واحد منبع تغذیه[۱۲](PSU) بررسی کرده‌اند. ورود چنین مطالعاتی به ادبیات نشان می‌دهد که ارزیابی GaN و SiC در مراکز داده باید بر مبنای معماری واقعی منبع تغذیه، سطح توان، فرکانس کاری و توزیع تلفات انجام شود و نمی‌توان مزیت یک فناوری را برای همه طبقات تبدیل یکسان فرض کرد.

از دید سامانه‌ای، منابع تغذیه و مراکز داده نمونه روشنی از پیوند میان بازده و چگالی توان هستند. افزایش فرکانس می‌تواند اجزای مغناطیسی را کوچک‌تر کند، اما در صورت افزایش تلفات کلیدزنی، تلفات مغناطیسی یا نیاز به فیلتر EMI بزرگ‌تر، بخشی از این مزیت از بین می‌رود. ازاین‌رو، ظرفیت GaN برای فرکانس بالا باید همراه با طراحی حرارتی و الکترومغناطیسی ارزیابی شود؛ همان‌گونه که استفاده از SiC در طبقات با توان یا ولتاژ بالاتر نیز به معنای حذف محدودیت‌های بسته‌بندی و خنک‌کاری نیست.

مرور این سه حوزه نشان می‌دهد که انتخابSi ، SiCیا GaN به شرایط کاربرد وابسته است و در برخی معماری‌ها، ترکیب فناوری‌ها می‌تواند از نظر عملکرد و هزینه مناسب‌تر باشد [۲]. بخش بعد، محدودیت‌های قابلیت اطمینان، درایور، پارازیت‌ها، مدیریت حرارتی و هزینه را به‌عنوان عوامل مؤثر بر این انتخاب بررسی می‌کند.

## ۷. محدودیت‌ها و ملاحظات طراحی

مزیت‌های عملکردی SiC و GaN تنها زمانی در سطح مبدل حفظ می‌شوند که طراحی مدار، درایور، بسته‌بندی و مسیر حرارتی با سرعت کلیدزنی این ادوات هماهنگ باشند. کاهش زمان گذار می‌تواند تلفات کلیدزنی را کم کند، اما هم‌زمان حساسیت مدار به اندوکتانس و ظرفیت‌های پارازیتی، اضافه‌ولتاژ، نوسان و تداخل الکترومغناطیسی را افزایش می‌دهد. بنابراین، محدودیت‌های این فناوری‌ها را نمی‌توان جدا از شرایط واقعی مبدل بررسی کرد[۳،۱۳].

### ۷-۱. قابلیت اطمینان و تنش‌های الکتریکی

در MOSFETهای SiC، اکسید گیت و فصل مشترک $SiC/SiO_2$ از نواحی حساس قابلیت اطمینان هستند. تنش الکتریکی گیت، دمای بالا و چرخه‌های کاری طولانی می‌توانند با رانش ولتاژ آستانه و تخریب تدریجی دی‌الکتریک همراه شوند. عبدالعلیم و همکاران [۴] این سازوکارها را در کنار خرابی‌های بسته‌بندی از عوامل مهم محدودکننده قابلیت اطمینان SiC دانسته‌اند. نتایج شی و همکاران [۵] و لین و همکاران [۲۰] نیز نشان می‌دهد پایداری دی‌الکتریک گیت به ساختار قطعه و شرایط تنش وابسته است؛ ازاین‌رو، ارزیابی قابلیت اطمینان باید با توجه به ولتاژ گیت، دما، مدت تنش و ساختار واقعی MOSFET انجام شود.

رفتار جریان معکوس نیز در برخی توپولوژی‌ها اهمیت دارد. در MOSFETهای SiC، مسیر هدایت معکوس می‌تواند شامل هدایت کانال و دیود بدنه باشد و سهم هر مسیر به راهبرد درایو و زمان مرده وابسته است. بنابراین، تنظیم زمان مرده و یکسوسازی سنکرون باید با در نظر گرفتن افت ولتاژ، تلفات و تنش‌های گذرای قطعه انجام شود؛ زیرا نحوه تنظیم آنها می‌تواند بر بازده، تنش الکتریکی قطعه و عملکرد بلندمدت سامانه اثر بگذارد [۴،۱۲].

ماهیت محدودیت‌های قابلیت اطمینان در GaN متفاوت است. درHEMT های GaN ، تله‌اندازی حامل‌ها پس از اعمال تنش ولتاژی می‌تواند مقاومت روشن دینامیکی را افزایش دهد و در نتیجه، تلفات هدایت در شرایط کلیدزنی از مقداری که بر اساس اندازه‌گیری ایستا انتظار می‌رود بیشتر شود. کوزاک و همکاران [۶] این رفتار را یکی از محورهای مهم پایداری و قابلیت اطمینان ادوات قدرت GaN معرفی کرده‌اند و لونگاتو و همکاران [۷] نیز وابستگی مقاومت روشن دینامیکی به سازوکارهای نشتی و تله‌ها را درHEMT های p-GaN بررسی کرده‌اند. افزون بر این، پایداری گیت و تحمل تنش‌های گذرا باید با توجه به معماری گیت، شرایط کاری و رده ولتاژی قطعه ارزیابی شوند.

[12] - Power Supply Unit (PSU)

### ۷-۲. درایور گیت، پارازیت‌ها و تداخل الکترومغناطیسی

در یک حلقه کموتاسیون سریع، حتی اندوکتانس پارازیتی کوچک می‌تواند در اثر تغییر سریع جریان، اضافه‌ولتاژ قابل توجهی ایجاد کند. برای نمایش مرتبه اول این اثر، ولتاژ القاشده روی اندوکتانس پارازیتی را می‌توان مطابق رابطه (۷) نوشت:

$$V_L = L_\sigma (di/dt) \quad (۷)$$

در رابطه (۷)، $V_L$ ولتاژ القاشده ناشی از اندوکتانس پارازیتی، $L_\sigma$ اندوکتانس مؤثر حلقه کموتاسیون و di/dt نرخ تغییر جریان است. این رابطه ساده نشان می‌دهد که با افزایش سرعت کلیدزنی، کاهش اندوکتانس حلقه قدرت و منبع مشترک اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. در عمل، مقدار اضافه‌ولتاژ به توزیع پارازیت‌ها، مسیر کموتاسیون و رفتار دینامیکی مدار وابسته است و رابطه (۷) تنها یک تقریب فیزیکی برای نشان‌دادن حساسیت سامانه است[۱۲].

درایور گیت در چنین شرایطی فقط وظیفه اعمال فرمان روشن و خاموش را ندارد؛ بلکه بخشی از کنترل گذار است. مقاومت گیت، ولتاژهای روشن و خاموش، اندوکتانس حلقه گیت و محل قرارگیری درایور بر dv/dt و di/dt، تلفات کلیدزنی و مصونیت در برابر روشن‌شدن ناخواسته اثر می‌گذارند. در SiC، کنترل حلقه گیت و حفاظت سریع در برابر شرایط خطا اهمیت ویژه‌ای دارد؛ در GaN نیز کوتاه‌کردن اتصال درایور تا قطعه و کاهش اندوکتانس منبع مشترک برای بهره‌برداری از سرعت ذاتی قطعه ضروری است[۲،۹].

همین گذارهای سریع می‌توانند انتشار هدایتی و تشعشعی EMI را تشدید کنند. مرور لی و همکاران[۱۳] نشان می‌دهد که کاهش EMI در مبدل‌های WBG معمولاً به یک اقدام منفرد محدود نمی‌شود و ترکیبی از بهینه‌سازی چیدمان، کنترل سرعت لبه، فیلترگذاری و مدیریت مسیرهای مد مشترک و مد تفاضلی لازم است. در نتیجه، افزایش فرکانس زمانی ارزش سامانه‌ای دارد که کاهش حجم اجزای غیرفعال بیش از هزینه‌ای باشد که برای فیلتر، حفاظت و کنترل گذارهای سریع پرداخت می‌شود.

### ۷-۳. مدیریت حرارتی، بسته‌بندی و هزینه

افزایش چگالی توان، مسئله حرارتی را حذف نمی‌کند؛ بلکه معمولاً توان تلف‌شده را در فضای کوچک‌تری متمرکز می‌کند و در نتیجه، مدیریت مسیر انتقال حرارت اهمیت بیشتری می‌یابد. برای یک برآورد مرتبه اول و در شرایط حالت ماندگار، اگر مسیر حرارتی قطعه از پیوند تا محیط با یک مقاومت حرارتی معادل نمایش داده شود، دمای پیوند را می‌توان مطابق رابطه (۸) تقریب زد:

$$T_j = T_a + P_{dev} R_{\theta JA} \quad (۸)$$

در رابطه (۸)، $T_j$ دمای پیوند، $T_a$ دمای محیط، $P_{dev}$ توان تلف‌شده متوسط در قطعه مورد بررسی و $R_{\theta JA}$ مقاومت حرارتی معادل پیوند تا محیط برای همان قطعه و شرایط نصب و خنک‌کاری است. این رابطه یک مدل ساده حالت ماندگار است و رفتار گذرای حرارتی، توزیع مکانی دما و شبکه چندلایه بسته‌بندی و خنک‌کاری را به‌طور کامل نمایش نمی‌دهد؛ بااین‌حال، نشان می‌دهد که کنترل دمای پیوند مستلزم توجه هم‌زمان به تلفات الکتریکی و مسیر انتقال حرارت است.

هدایت حرارتی بالاتر SiC به انتقال گرما از ناحیه فعال کمک می‌کند، ولی عملکرد حرارتی نهایی همچنان به اتصال تراشه، زیرلایه، مواد رابط حرارتی و سامانه خنک‌کاری وابسته است. در GaN، به‌ویژه در ساختارهای جانبی، پخش گرما از ناحیه کانال و مقاومت حرارتی زیرلایه و بسته‌بندی می‌توانند به محدودیت تبدیل شوند. کین و همکاران [۱۴] نشان داده‌اند که برای ادوات WBG، طراحی الکتریکی و حرارتی بسته‌بندی باید هم‌زمان انجام شود. روئس و همکاران [۲۱] نیز در نیم‌پل‌های GaN نشان داده‌اند که هم‌طراحی الکتریکی و حرارتی زیرلایه می‌تواند برای کنترل هم‌زمان پارازیت‌ها و انتقال گرما مؤثر باشد.

هزینه نیز می‌تواند انتخابی را که از نظر مشخصات قطعه جذاب به نظر می‌رسد تغییر دهد. قیمت بالاتر قطعه، الزامات درایور و بسته‌بندی و پیچیدگی کنترل EMI بخشی از هزینه اولیه استفاده از SiC و GaN هستند؛ در مقابل، کاهش تلفات، کوچک‌شدن سامانه خنک‌کاری و اجزای مغناطیسی یا افزایش چگالی توان می‌تواند بخشی از این اختلاف را در سطح سامانه جبران کند[۲،۸].

بنابراین، مقایسه اقتصادی بهتر است بر پایه هزینه کل مبدل و، در کاربردهای با ساعات کار زیاد، هزینه چرخه عمر انجام شود، نه فقط قیمت کلید نیمه‌هادی.

در مجموع، محدودیت‌های قابلیت اطمینان، پارازیت، EMI، انتقال حرارت و هزینه مستقل از یکدیگر نیستند. کندکردن لبه کلیدزنی ممکن است EMI و اضافه‌ولتاژ را کاهش دهد، اما تلفات را افزایش دهد؛ فشرده‌سازی بسته‌بندی می‌تواند اندوکتانس را کم کند، ولی چگالی شار حرارتی را بالا ببرد. ازاین‌رو، بهره‌برداری مؤثر از SiC و GaN به یک طراحی چندهدفه در سطح مبدل نیاز دارد. این مصالحه‌ها مبنای بحث بخش بعد درباره مسیر توسعه و محدوده کاربرد آینده دو فناوری هستند.

## ۸. بحث و چشم‌انداز آینده

برآیند شواهد مرورشده نشان می‌دهد که مرز کاربرد SiC و GaN را نمی‌توان با یک آستانه ثابت از ولتاژ، توان یا فرکانس تعیین کرد؛ زیرا مزیت هر فناوری در نتیجه برهم‌کنش ویژگی‌های ماده، رفتار قطعه و الزامات مبدل شکل می‌گیرد. در وضعیت کنونی، بلوغ بیشتر SiC در رده‌های ولتاژی بالاتر و ویژگی‌های حرارتی مناسب آن، استفاده از این فناوری را در بسیاری از مبدل‌های پرتوان تسهیل کرده است؛ در مقابل، GaNدر کاربردهایی که کاهش انرژی کلیدزنی و افزایش فرکانس بتواند به کوچک‌سازی اجزای غیرفعال و افزایش چگالی توان منجر شود، ظرفیت قابل توجهی نشان می‌دهد [۲۲، ۲]. بنابراین، تفاوت اصلی این دو فناوری را باید در محدوده شرایطی جست‌وجو کرد که مزیت سطح قطعه به مزیت قابل اندازه‌گیری در سطح مبدل تبدیل می‌شود، نه در برتری مطلق یک فناوری بر دیگری.

برای SiC، مسیر توسعه آینده بیش از افزایش صرف مشخصات اسمی قطعه، به رفع محدودیت‌هایی وابسته است که در سطح سامانه ظاهر می‌شوند. بهبود پایداری اکسید گیت، افزایش تحمل شرایط خطا و اتصال کوتاه، کاهش پارازیت‌های بسته‌بندی و توسعه راهکارهای حرارتی برای دمای کاری بالا می‌توانند فاصله میان قابلیت بالقوه ماده و عملکرد عملی مبدل را کاهش دهند. بوفولو و همکاران[۲] کاربردهای ولتاژ بالاتر را از حوزه‌های مهم گسترش SiC دانسته‌اند و مطالعات قابلیت اطمینان نیز نشان می‌دهند که پایداری گیت و بسته‌بندی همچنان باید همراه با افزایش توان و چگالی توان توسعه یابد[۴،۵].

در GaN، یکی از پرسش‌های مهم آینده گسترش محدوده کاربرد از بازار تثبیت‌شده ادوات جانبی GaN در رده‌های ولتاژی متداول به کلاس‌های ولتاژی بالاتر است. ساختارهای جانبی HEMT مزیت کلیدزنی سریع را فراهم کرده‌اند، اما محدودیت‌های میدان، تله‌اندازی حامل، مقاومت روشن دینامیکی، پایداری گیت و انتقال حرارت می‌توانند بهره‌برداری از این مزیت را محدود کنند. فودا و همکاران [۱۰] توسعه ساختارهای عمودی GaN را یکی از مسیرهای مهم برای افزایش ولتاژ انسداد معرفی کرده‌اند. یانگ و همکاران [۲۳] یک JFET عمودی GaN با ولتاژ نامی ۱٫۲ کیلوولت را در مبدل باک با کلیدزنی در ولتاژ صفر (ZVS) و ولتاژ کاری ۸۰۰ ولت ارزیابی کرده‌اند. بیشینه بازده مبدل در فرکانس یک مگاهرتز ۹۷٫۷ درصد و در فرکانس ۵۰۰ کیلوهرتز ۹۸٫۰ درصد گزارش شده است. این نتایج، امکان ترکیب ولتاژ کاری بالا و فرکانس کلیدزنی بالا را در ساختار عمودی بررسی‌شده نشان می‌دهند، اما نباید بهHEMT های جانبی یا شرایط کلیدزنی سخت تعمیم داده شوند. گسترش کاربرد صنعتی این فناوری نیز به بلوغ ساخت، قابلیت اطمینان و بسته‌بندی وابسته است.

جمع‌بندی این مرور، ضرورت ارزیابی همزمان قطعه و سامانه را نشان می‌دهد؛ زیرا عملکرد کلید قدرت به درایور، چیدمان، بسته‌بندی، مسیر حرارتی، اجزای غیرفعال و توپولوژی وابسته است. ازاین‌رو، بهره‌برداری مؤثر از SiC و GaN مستلزم هم‌طراحی الکتریکی، حرارتی و مکانیکی مبدل است [۱۳،۱۴،۲۱]. در مبدل‌های چندمرحله‌ای نیز فناوری مناسب مسیر اصلی توان ممکن است با فناوری مناسب طبقه DC/DC فرکانس بالا متفاوت باشد. بنابراین، ترکیبSi ، SiCو GaN می‌تواند راهبردی متناسب با نقطه کاری و وظیفه هر طبقه باشد[۲،۱۱].

از نظر روش پژوهش نیز یک خلأ مهم باقی است. مقایسه مستقیم نتایج منتشرشده همیشه امکان‌پذیر نیست، زیرا مطالعات از توپولوژی، رده ولتاژ، توان، فرکانس، روش خنک‌کاری و معیارهای اندازه‌گیری متفاوت استفاده می‌کنند. برای پژوهش‌های آینده،

آزمون Si، SiC و GaN در یک توپولوژی و پروفایل بار مشترک و با مرز حرارتی و معیارهای EMI یکسان، امکان نتیجه‌گیری معتبرتری درباره بازده، چگالی توان و قابلیت اطمینان فراهم می‌کند. علاوه بر بازده نقطه‌ای، گزارش منحنی بازده در بارهای مختلف، دمای پیوند، انرژی کلیدزنی، رفتار گذرا، EMI و عملکرد تحت شرایط غیرعادی می‌تواند مقایسه را به شرایط بهره‌برداری واقعی نزدیک‌تر کند.

در افق بلندمدت، نقش این نیمه‌هادی‌ها فقط به افزایش بازده یک مبدل منفرد محدود نمی‌شود. ژانگ و همکاران [۲۴] توسعه نیمه‌هادی‌های با گاف نواری پهن و الکترونیک قدرت پربازده را در پیوند با برقی‌سازی، انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش اتلاف انرژی بررسی کرده‌اند. با این حال، اثر سامانه‌ای زمانی معنی‌دار است که افزایش بازده با قابلیت اطمینان، طول عمر، مواد و بسته‌بندی و هزینه چرخه عمر همراه باشد. بنابراین، مسیر آینده محتمل‌تر، حذف کامل سیلیکون یا سلطه یک فناوری واحد نیست؛ بلکه حرکت به سمت انتخاب وابسته به کاربرد و هم‌طراحی چندهدفه است که در آن مزیت فیزیکی هر نیمه‌هادی فقط در صورتی ارزشمند تلقی می‌شود که در عملکرد واقعی سامانه حفظ شود.

## ۹. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بررسی انجام‌شده نشان می‌دهد که نقش SiC و GaN در مبدل‌های الکترونیک قدرت را نمی‌توان به جایگزینی مستقیم سیلیکون با یک فناوری جدید محدود کرد. مزیت هر فناوری زمانی در سطح مبدل حفظ می‌شود که ویژگی‌های ماده و رفتار قطعه با توپولوژی، سطح ولتاژ و توان، فرکانس کلیدزنی، طراحی درایور، بسته‌بندی و مدیریت حرارتی سازگار باشند SiC .به دلیل ویژگی‌های مناسب در رده‌های ولتاژی و توان بالاتر، در بسیاری از مبدل‌های پرتوان و سامانه‌های کشش و انرژی مورد توجه است؛ در مقابل، GaNدر کاربردهایی که افزایش فرکانس کلیدزنی بتواند به کاهش اندازه اجزای غیرفعال و افزایش چگالی توان منجر شود، ظرفیت قابل توجهی دارد. بنابراین، حوزه کاربرد این دو فناوری بیش از آنکه با یک مرز ثابت تعیین شود، به شرایط کاری و الزامات طراحی مبدل وابسته است.

نتایج این مرور نشان می‌دهد که مقایسه SiC و GaN بر اساس یک شاخص منفرد، مانند مقاومت روشن، فرکانس کلیدزنی یا قیمت قطعه، برای تصمیم‌گیری در سطح مبدل کافی نیست. افزایش سرعت کلیدزنی می‌تواند در کنار کاهش تلفات گذار، حساسیت مدار به عناصر پارازیتی، اضافه‌ولتاژ و EMI را افزایش دهد؛ به همین ترتیب، افزایش چگالی توان نیز الزامات مدیریت حرارتی و بسته‌بندی را تشدید می‌کند. ازاین‌رو، در حوزه‌هایی که هر دو فناوری قابلیت استفاده دارند، انتخاب باید بر مبنای ارزیابی هم‌زمان تلفات و بازده، چگالی توان، شرایط حرارتی، قابلیت اطمینان، EMIو هزینه در سطح مبدل انجام شود. این نتیجه همچنین نشان می‌دهد که در مبدل‌های چندمرحله‌ای، استفاده ترکیبی ازSi ، SiCو GaN می‌تواند متناسب با وظیفه و نقطه کاری هر طبقه، نسبت به استفاده یکنواخت از یک فناوری انعطاف طراحی بیشتری فراهم کند.

برای پژوهش‌های آینده، مقایسه مستقیم Si ، SiC و GaN در شرایط کاری و حرارتی همسان، همراه با ارزیابی عملکرد، قابلیت اطمینان و هزینه چرخه عمر، پیشنهاد می‌شود. برآیند این مرور آن است که انتخاب فناوری باید متناسب با کاربرد و بر پایه هم‌طراحی قطعه و مبدل انجام شود.

## ۱۰. منابع

1. Chaudhary, O. S., Denaï, M., Refaat, S. S., & Pissanidis, G. (2023). Technology and applications of wide bandgap semiconductor materials: Current state and future trends. Energies, 16(18), 6689. https://doi.org/10.3390/en16186689
2. Buffolo, M., Favero, D., Marcuzzi, A., De Santi, C., Meneghesso, G., Zanoni, E., & Meneghini, M. (2024). Review and outlook on GaN and SiC power devices: Industrial state-of-the-art, applications,

and perspectives. IEEE Transactions on Electron Devices, 71(3), 1344-1355. https://doi.org/10.1109/TED.2023.3346369
3. Avraham, T., Dhyani, M., & Bernstein, J. B. (2025). Reliability challenges, models, and physics of silicon carbide and gallium nitride power devices. Energies, 18(5), 1046. https://doi.org/10.3390/en18051046
4. Abdelaleem, A., Monfared, M., Jennings, M., Jahdi, S., Karout, M. A., Nel, B., Evans, J., & Fisher, C. A. (2026). SiC MOSFET reliability: Review of degradation mechanisms, failures, and enhancement strategies. e-Prime, 17, 201163. https://doi.org/10.1016/j.eprime.2026.201163
5. Shi, L., Qian, J., Jin, M., Bhattacharya, M., Houshmand, S., Yu, H., Shimbori, A., White, M. H., & Agarwal, A. K. (2024). Gate oxide reliability in silicon carbide planar and trench metal-oxide-semiconductor field-effect transistors under positive and negative electric field stress. Electronics, 13(22), 4516. https://doi.org/10.3390/electronics13224516
6. Kozak, J. P., Zhang, R., Porter, M., Song, Q., Liu, J., Wang, B., Wang, R., Saito, W., & Zhang, Y. (2023). Stability, reliability, and robustness of GaN power devices: A review. IEEE Transactions on Power Electronics, 38(7), 8442-8471. https://doi.org/10.1109/TPEL.2023.3266365
7. Longato, S. L., Favero, D., Stockman, A., Nardo, A., Vanmeerbeek, P., Tack, M., Meneghesso, G., Zanoni, E., De Santi, C., & Meneghini, M. (2025). Impact of drain-source leakage on the dynamic Ron of power HEMTs with p-GaN gate. Microelectronics Reliability, 168, 115714. https://doi.org/10.1016/j.microrel.2025.115714
8. Soomro, H. A., Md Khir, M. H. B., Mohd Zulkifli, S. A. B., Abro, G. E. M., & Abualnaeem, M. M. (2025). Applications of wide bandgap semiconductors in electric traction drives: Current trends and future perspectives. Results in Engineering, 26, 104679. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104679
9. Rafin, S. M. S. H., Ahmed, R., Haque, M. A., Hossain, M. K., Haque, M. A., & Mohammed, O. A. (2023). Power electronics revolutionized: A comprehensive analysis of emerging wide and ultrawide bandgap devices. Micromachines, 14(11), 2045. https://doi.org/10.3390/mi14112045
10. Fouda, S., Abouelatta, M., Shaker, A., & Saeed, A. (2026). Advances in GaN power HEMT design and reliability for high-performance power applications. Results in Engineering, 30, 111064. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.111064
11. Suthar, A. N., Venkataramanaiah, J., & Suresh, Y. (2025). Conventional, wide-bandgap, and hybrid power converters: A comprehensive review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 213, 115419. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115419
12. Rasul, A., Teixeira, R., & Baptista, J. (2025). Silicon carbide converter design: A review. Energies, 18(8), 2140. https://doi.org/10.3390/en18082140
13. Li, C., Ma, Q., Tong, Y., Wang, J., & Xu, P. (2023). A survey of conductive and radiated EMI reduction techniques in power electronics converters across wide-bandgap devices. IET Power Electronics, 16(13), 2121-2137. https://doi.org/10.1049/pel2.12532
14. Qin, Y., Albano, B., Spencer, J., Lundh, J. S., Wang, B., Buttay, C., Tadjer, M., DiMarino, C. M., & Zhang, Y. (2023). Thermal management and packaging of wide and ultra-wide bandgap power devices: A review and perspective. Journal of Physics D: Applied Physics, 56(9), 093001. https://doi.org/10.1088/1361-6463/acb4ff
15. Reali, A., Alemanno, A., Ronchi, F., Rossi, C., & Florian, C. (2024). Development of GaN-based, 6.6 kW, 450 V, bi-directional on-board charger with integrated 1 kW, 12 V auxiliary DC-DC converter with high power density. Micromachines, 15(12), 1470. https://doi.org/10.3390/mi15121470
16. Narasipuram, R. P., & Mopidevi, S. (2024). Assessment of E-mode GaN technology, practical power loss, and efficiency modelling of iL²C resonant DC-DC converter for xEV charging applications. Journal of Energy Storage, 91, 112008. https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112008
17. Park, H., Kim, D.-Y., & Yi, J. (2024). A brief review of power semiconductors for energy conversion in photovoltaic module systems. Journal of Electrical and Electronic Materials, 37(2), 133-140. https://doi.org/10.4313/JKEM.2024.37.2.2

18. Chakraborty, R., Eskilson, T., Biswas, S., & Makoschitz, M. (2024). A comparative analysis of efficiency and losses in a 5 kW hybrid and full-SiC converter, for PV applications in Austria. Energies, 17(22), 5600. https://doi.org/10.3390/en17225600
19. Tsai, S. Q., Chen, W. C., Gundabathina, P., Tu, C. C., Hung, C. L., Hsiao, Y. K., Tsui, B.-Y., & Chen, P. H. (2025). Comparative analysis of power devices in power supply units for AI server applications. 2025 IEEE Energy Conversion Congress & Exposition Asia (ECCE-Asia). https://doi.org/10.1109/ECCE-Asia63110.2025.11112152
20. Lin, W.-C., Yu, W.-C., Chen, B.-R., Hsiao, Y.-S., Huang, Z.-H., Hung, C.-L., Hsiao, Y.-K., Yeh, N.-J., Kuo, H.-C., Tu, C.-C., & Wu, T.-L. (2023). Investigation of the time dependent gate dielectric stability in SiC MOSFETs with planar and trench gate structures. Microelectronics Reliability, 150, 115141. https://doi.org/10.1016/j.microrel.2023.115141
21. Rueß, M., Mack, P., Koch, D., Reck, A., Weiser, M. C. J., Zimmermann, A., & Kallfass, I. (2025). GaN half-bridges on electrical and thermal co-designed ceramic substrates. Power Electronic Devices and Components, 11, 100091. https://doi.org/10.1016/j.pedc.2025.100091
22. Galioto, G., Vitale, G., Sferlazza, A., Lullo, G., & Giaconia, G. C. (2026). Wide and ultrawide bandgap power semiconductors: A comprehensive system-level review. Electronics, 15(4), 835. https://doi.org/10.3390/electronics15040835
23. Yang, X., Zhang, R., Yang, Q., Song, Q., Litchford, E., Walker, A. J., Pidaparthi, S., Drowley, C., Dong, D., Li, Q., & Zhang, Y. (2024). Evaluation and MHz converter application of 1.2-kV vertical GaN JFET. IEEE Transactions on Power Electronics, 39(12), 15720-15731. https://doi.org/10.1109/TPEL.2024.3445667
24. Zhang, Y., Dong, D., Li, Q., Zhang, R., Udrea, F., & Wang, H. (2025). Wide-bandgap semiconductors and power electronics as pathways to carbon neutrality. Nature Reviews Electrical Engineering, 2, 155-172. https://doi.org/10.1038/s44287-024-00135-5

# The Role of SiC and GaN Semiconductors in Improving the Performance of Power Electronic Converters

**Zahra Aref Darabi[1]**

[1] Faculty Member, Electrical Engineering, Islamic Azad University, Darab, Iran , zahra.aref@iau.ir

**Abstract**- The growing demand for high-efficiency, high-power-density converters has made wide-bandgap semiconductors one of the main development paths in power electronics. This review analytically examines the characteristics, performance, and applications of silicon carbide and gallium nitride devices in comparison with conventional silicon technology. The reviewed studies indicate that silicon carbide, owing to its high critical electric field, favorable thermal conductivity, and greater maturity at higher voltage ratings, is better suited to high-power converters, traction systems, and energy applications. In contrast, gallium nitride enables faster switching, higher operating frequencies, and reduced passive-component size. Nevertheless, circuit parasitics, electromagnetic interference, thermal management, reliability, and cost may limit the achievable benefits of both technologies. Overall, the appropriate semiconductor technology should be selected according to operating conditions and the converter's system-level design.

**Keywords:** Power Electronics, Silicon Carbide, Gallium Nitride, Wide-Bandgap Semiconductors, Power Converter, Power Density, Reliability.