



УДК 621.314.1

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ
ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ НА ОСНОВЕ
ТРАНЗИСТОРОВ С ШИРОКОЙ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНОЙ.****Лукиных Илья Олегович,**г. Екатеринбург, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина», ИРИТ-РТФ, Аспирант,
Email: ilya.lukinykh.01@bk.ru**Аннотация**

В статье представлен обзор современных тенденций в области высокоэффективных импульсных источников питания (ИИП), использующих силовые транзисторы на основе широкозонных полупроводниковых материалов карбида кремния (SiC) и нитрида галлия (GaN). Рассматриваются физико-технические предпосылки перехода от кремниевых MOSFET и IGBT к широкозонным ключам, производится сравнение ширины запрещенной зоны, критической напряженности поля, подвижности носителей и показателей качества (FOM), а также их влияния на удельное сопротивление канала и допустимые частоты коммутации. Выполняется анализ эволюции схемотехники ИИП, в частности, разобран переход от классических топологий с жесткой коммутацией к резонансным и многоуровневым архитектурам. Показано, как применение SiC и GaN ключей позволяет повысить КПД, плотность мощности и уменьшить габариты при условии комплексной оптимизации топологий, магнитных компонентов и компоновки печатных плат. Отдельное внимание уделено инженерным ограничениям – электромагнитной совместимости, тепломеханической согласованности материалов, снижению времени выдержки короткого замыкания, а также специфике отказов SiC MOSFET и GaN HEMT. В заключении обсуждаются перспективы сверхширокозонных материалов, вертикальных GaN структур и новых высокочастотных магнитных материалов как следующего этапа развития высокоэффективных ИИП.

Ключевые слова: импульсные источники питания; широкозонные полупроводники; карбид кремния; нитрид галлия; SiC MOSFET; GaN HEMT; резонансные и многоуровневые преобразователи; электромагнитная совместимость.

**CURRENT TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF HIGH-EFFICIENCY
SWITCHED-MODE POWER SUPPLIES BASED ON WIDE-BANDGAP
TRANSISTORS****Lukinykh Ilya Olegovich,**Yekaterinburg, Ural Federal University, IRIT-RTF.
Postgraduate Student.

ABSTRACT

This paper presents a review of current trends in high-efficiency switched-mode power supplies (SMPs) employing power transistors based on wide-bandgap semiconductor materials, namely silicon carbide (SiC) and gallium nitride (GaN). It examines the physical and technical rationale for the transition from silicon MOSFETs and IGBTs to wide-bandgap switching devices, including a comparison of bandgap energy, critical electric field strength, carrier mobility, and figures of merit (FOMs), as well as their effects on specific on-state resistance and allowable switching frequencies. The evolution of SMPs circuit design is analyzed, particularly the transition from conventional hard-switching topologies to resonant and multilevel architectures. The paper demonstrates how SiC and GaN switches can improve efficiency and power density while reducing converter size, provided that circuit topologies, magnetic components, and PCB layouts are comprehensively optimized. Particular attention is given to engineering constraints, including electromagnetic compatibility, thermomechanical matching of materials, reduced short-circuit withstand time, and failure mechanisms specific to SiC MOSFETs and GaN HEMTs. The concluding section discusses ultra-wide-bandgap materials, vertical GaN structures, and novel high-frequency magnetic materials as the next stage in the development of high-efficiency SMPs.

Keywords: switched-mode power supplies; wide-bandgap semiconductors; silicon carbide; gallium nitride; SiC MOSFET; GaN HEMT; resonant and multilevel converters; electromagnetic compatibility.

1. Введение

На протяжении последних двух десятилетий в силовой электронике постепенно происходит смена элементной базы: традиционные кремниевые (Si) MOSFET и IGBT вытесняются полупроводниковыми приборами на основе широкозонных материалов (Wide Bandgap, WBG). Наиболее распространенными на данный момент представителями данного типа материалов являются карбид кремния (SiC) и нитрид галлия (GaN) [1-4].

Широкая запрещенная зона обуславливает на порядок более высокую критическую напряженность электрического поля пробоя, что позволяет многократно уменьшить толщину запирающего дрейфового слоя полупроводниковой структуры при сохранении высокого класса рабочего напряжения.

Следствием уменьшения геометрических размеров активной области кристалла становится радикальное снижение паразитных емкостей (C_{iss} , C_{oss}), заряда затвора (Q_g) и заряда обратного восстановления (Q_{rr}), что открывает возможность повышения рабочих частот коммутации до сотен килогерц, даже в устройствах мощностью десятки киловатт и до мегагерцового диапазона в преобразователях с мощностью менее одного киловатта, при сохранении высокой энергетической эффективности, что обеспечивает кратное сокращение габаритов пассивных реактивных компонентов и радиаторов [2].

Параллельно со снижением себестоимости пластин SiC и освоением технологии GaN-on-Si (GaN на кремнии) экономическая целесообразность применения широкозонных полупроводниковых приборов распространилась в массовые сегменты: зарядную инфраструктуру и бортовые системы электротранспорта, источники питания телекоммуникационных узлов и дата-центров, а также потребительскую микроэлектронику.

Однако полноценная реализация потенциала широкозонных приборов требует фундаментального перестроения структуры некоторых узлов ИИП: рост скоростей переключения ($dU/dt > 100$ В/нс, $di/dt > 5$ кА/мкс) зачастую нивелирует преимущества

прямого замещения кремния в устаревших схемах и требует перехода к специализированным топологиям мягкой коммутации, планарным магнитным компонентам и новым методам подавления электромагнитных помех [2].

1.1. Цель исследования

Цель данной работы: комплексный научно-технический анализ современных тенденций в схемотехнике и конструировании высокоэффективных импульсных источников питания на основе SiC и GaN. В статье систематизированы границы применимости данных полупроводниковых ключей, рассмотрена эволюция топологий от традиционных схем к резонансным и многоуровневым архитектурам, оценены факторы системной экономической эффективности (TCO), а также проанализированы ключевые инженерные барьеры, включающие проблемы электромагнитной совместимости, стойкости диэлектриков и физической надежности кристаллов в критических режимах работы.

1.2. Материалы и методы исследования

Информационной и фактологической базой исследования послужили научно-технические публикации, а также практические руководства ведущих производителей силовых полупроводниковых компонентов и интегральных схем. Поиск и систематизация источников осуществлялись в базах данных IEEE Xplore, ScienceDirect, Scopus, Web of Science и eLIBRARY по ключевым дескрипторам, охватывающим топологии мягкой коммутации, планарные элементы и широкозонные полупроводниковые приборы.

Методология работы базируется на четырех взаимосвязанных подходах:

Сравнительный физико-технический анализ (сопоставление фундаментальных электрофизических параметров и динамических характеристик кремния, SiC и GaN для определения предельных частотно-энергетических возможностей структур).

Схемотехнический и топологический анализ (оценка режимов коммутации и сопоставление потерь в ключевых звеньях ИИП).

Метод многокритериального компромисса (выявление взаимосвязей между рабочей частотой, КПД, объемной плотностью мощности, параметрами ЭМС и системной стоимостью владения).

Анализ отказов (обобщение экспериментальных данных по надежности SiC и GaN).

2. Широкозонные материалы и их влияние на параметры силовых приборов

2.1. Материальные свойства SiC и GaN в сравнении с кремнием

Для карбида кремния важным является наличие нескольких политипов, которые отличаются типом решетки и анизотропией параметров. В силовой электронике наибольшее практическое применение нашел политип 4H-SiC благодаря более высокой подвижности электронов и наилучшему сочетанию критической напряженности и тепловых свойств [3].

Нитрид галлия в силовых приборах преимущественно используется в гексагональной структуре (hexagonal GaN), обладающей более широкой запрещенной зоной, а значит и лучшими характеристиками для устройств, работающих с высоким напряжением шины питания.

Важной особенностью полупроводниковых элементов на основе GaN является возможность реализации структуры с высокой подвижностью электронов (High Electron Mobility Transistor, HEMT), что обеспечивает практически идеальные характеристики переключения и минимальные времена включения и выключения [3].

Сравнение основных параметров данных типов материалов с кремнием приведено в таблице 1 [5, 6]. Среди интересного можно выделить сниженную подвижность электронов внутри широкозонных полупроводников, обусловленную свойствами материала. В результате получается, что улучшения характеристик SiC и GaN следует ожидать только в

случаях, когда кристалл можно сделать значительно меньшим, чем в случае использования кремния, что и обсуждалось ранее.

Таблица 1 – Сравнение основных параметров материалов полупроводников

Материал	Ширина запрещенной зоны, эВ	Критическая напряженность поля, МВ/см	Подвижность электронов, см ² /(В·с)
Si	1,12	0,3	1400
4H-SiC	3,26	2,8	900
Hexagonal GaN	3,40	3,3	1000

Более наглядный с инженерной точки зрения график приведен ниже (см. рисунок 1). На нем изображена зависимость удельного сопротивления канала в открытом состоянии от пробивного напряжения полупроводниковых устройств на основе разных материалов. Как можно видеть, характеристики SiC транзисторов с пробивным напряжением 800 В приблизительно соответствуют характеристикам Si транзистора с пробивным напряжением 200 В. При этом график также демонстрирует, что при росте требуемого блокируемого напряжения до десятков киловольт преимущество широкозонных материалов по удельной проводимости только увеличивается.

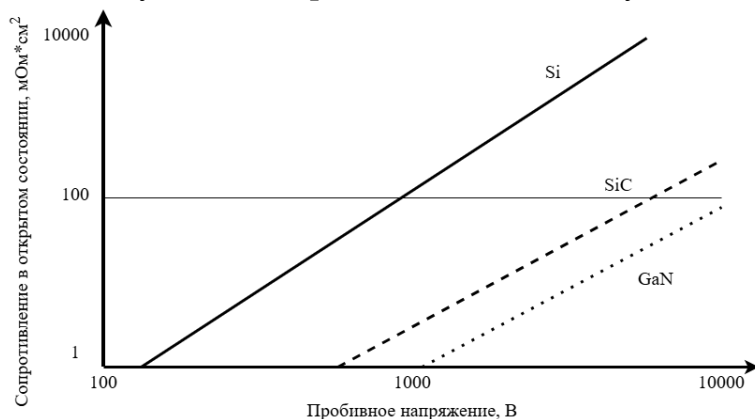


Рисунок 1 – График зависимости удельного сопротивления канала транзистора в открытом состоянии от пробивного напряжения

2.2. Отличия SiC MOSFET и GaN HEMT от кремниевых ключей

Для формализованного сравнения материалов и приборов в литературе используют показатели качества (figure of merit, FOM) [3].

Балиговский высокочастотный FOM (BHFOM) для материалов показывает, насколько потери при коммутации зависят от подвижности электронов и критической напряженности поля; расчеты, нормированные к кремнию приведены в таблице 2 [3]. В результате получается, что GaN примерно в два раза превосходит SiC и почти в 200 раз Si по этому критерию.

Для реальных приборов вводятся также BFOM, учитывающий удельное сопротивление и полный заряд затвора. Литература [3, 5, 6] показывает, что для силовых MOSFET с напряжениями 900 и 1700 В на SiC и GaN эти FOM показатели существенно ниже, чем у кремниевых аналогов, то есть для того же уровня блокируемого напряжения удастся получить меньшие потери на проводящее состояние и переключение.

В инженерной практике это позволяет при заданном уровне КПД перераспределить допустимый баланс потерь в пользу частотно-зависимой составляющей, что открывает возможность форсирования рабочей частоты и минимизации объемов моточных узлов и конденсаторов фильтра.

Таблица 2 – Сравнение общепринятых показателей качества для различных полупроводниковых структур

Показатель качества	Si	4H-SiC	GaN
BHFOМ	1	81,6	197
BFOM	1	6,15	8,97

С практической точки зрения, в сравнении с классическими кремниевыми MOSFET и, особенно, IGBT, широкозонные ключи демонстрируют существенно меньшие времена переключения: порядка 10-100 нс для SiC и GaN против типичных значений 100 нс по фронту нарастания и до 2 мкс по фронту спада тока у IGBT. Сокращение времени коммутации напрямую снижает потери на включение и выключение, что особенно важно при повышении частоты.

Для SiC MOSFET дополнительно отмечается наличие встроенного паразитного диода с существенно сниженным зарядом обратного восстановления Q_{rr} , что уменьшает потери на переключение даже в топологиях с жестким переключением без применения резонансных режимов [1].

GaN HEMT, напротив, конструктивно лишен паразитного диода, что в большинстве случаев рассматривается как преимущество: разработчик может самостоятельно выбирать необходимость и параметры внешнего диода, подстраивая характеристики под конкретную топологию. В синхронных схемах, где роль диода выполняет управляемый транзистор, GaN HEMT вообще оказывается практически безальтернативным решением [1, 7, 8].

2.3. Ограничения и недостатки широкозонных ключей

Несмотря на перечисленные преимущества, широкозонные транзисторы обладают специфическими недостатками, которые ограничивают области их применения. Во-первых, высокая чувствительность к напряжению затвор-исток накладывает жесткие требования к драйверу: даже кратковременные превышения допустимых уровней напряжений могут привести к деградации или выходу устройства из строя, что особенно актуально при высоких du/dt и di/dt . Во-вторых, хотя стоимость SiC и GaN заметно снизилась, она все еще остается выше стоимости массовых кремниевых решений, что вынуждает использовать их прежде всего в приложениях, где на первое место поставлены эффективность и габариты источника питания [3, 7].

Дополнительным инженерным ограничением для SiC и GaN является согласование коэффициента термического расширения кристалла и материала корпуса/подложки. Коэффициент термического расширения 4H-SiC ($\sim 5,2$ ppm/K) и GaN ($\sim 3,2$ – $5,6$ ppm/K) несколько выше, чем у кремния ($2,6$ ppm/K), поэтому при использовании классических материалов корпусов и подложек (например, медных оснований и эпоксидных заливок) возможно возникновение повышенных термомеханических напряжений на границе раздела. Практические решения включают использование AlN, BeO и Al_2O_3 подложек с близким СТЕ и оптимизацию геометрии кристалла, однако это дополнительно усложняет технологию и повышает стоимость модулей [3].

Дополнительно можно отметить ухудшение электромагнитной совместимости (ЭМС) при переходе к широкозонным ключам: повышение частоты и крутизны фронтов тока и напряжения приводит к росту уровня высокочастотных помех, требуя более сложных фильтров, экранирования и оптимизации топологий печатных плат. Эти факторы делают выбор SiC и GaN результатом компромисса между КПД, плотностью мощности, ЭМС и стоимостью [9].

3. Эволюция топологий импульсных источников питания в контексте использования широкозонных полупроводников

3.1. Топологии как инструмент балансировки требований

Проектирование импульсных источников питания (ИИП) представляет собой компромисс между удельными массогабаритными показателями, КПД, электромагнитной

совместимостью (ЭМС) и стоимостью. Традиционный путь масштабирования плотности мощности – повышение частоты коммутации с целью уменьшения объемов реактивных компонентов в классических схемах с жесткой коммутацией (Hard Switching) наталкивается на фундаментальные ограничения. Во-первых, динамические потери на переключение $P_{пер}$ растут пропорционально частоте (1), нивелируя выигрыш от снижения статических потерь.

$$P_{пер} = \frac{C_{oss} \cdot U_{си}^2 \cdot f_{пер}}{2}, \quad (1)$$

где C_{oss} – выходная емкость транзистора, Ф;

$U_{си}$ – напряжение сток-исток в момент переключения, В;

$f_{пер}$ – частота переключения.

Во-вторых, сверхвысокие скорости нарастания напряжения ($dU/dt > 100$ В/нс) и тока (di/dt), характерные для быстродействующих приборов, генерируют интенсивный спектр высокочастотных кондуктивных и излучаемых помех, требуя усложнения входных и выходных фильтров ЭМС, масса которых начинает превосходить массу силовой части. Наконец, в схемах с полумостовыми плечами заряд обратного восстановления встроенного паразитного диода кремниевых ключей (Q_{rr}) делает работу на повышенных частотах в режиме непрерывных токов практически невозможной из-за катастрофического сквозного тока.

3.2. Роль SiC и GaN в трансформации схемотехнических решений

Итак, выдающиеся физические параметры широкозонных материалов (малая емкость C_{oss} , околонулевой Q_{rr}) создают предпосылки для работы на частотах от сотен кГц до единиц МГц. Однако простая замена кремниевых MOSFET/IGBT на приборы из SiC или GaN в устоявшихся топологиях дает лишь локальный прирост КПД и быстро упирается в описанные частотные барьеры.

Подлинный скачок удельной мощности достигается за счет интеграции широкозонных полупроводников в топологии с мягкой коммутацией (Soft Switching), обеспечивающих переключение при нулевом напряжении (ZVS) или нулевом токе (ZCS). Устранение паразитного эффекта обратного восстановления диода позволило реанимировать схемы, ранее считавшиеся непрактичными на кремнии (в частности, речь идет про переключение при нулевом токе, которое редко использовалось инженерами из-за серьезной роли Q_{rr} в потерях на полупроводниках). В таблице 3 приведено сравнение топологий при использовании кремниевых и широкозонных транзисторов [10-14].

Таблица 3 – Сравнение топологий при использовании разных типов полупроводников

Диапазон мощности	Доминирующая кремниевая топология	Новая топология на базе GaN / SiC	Физическая причина перехода
до 150 Вт (бытовая электроника)	Квазирезонансный обратноходовой преобразователь (до 100 кГц)	Обратноходовой преобразователь с активным демпфером (300 кГц – 1 МГц, GaN)	Утилизация энергии индуктивности рассеяния, реализация полноценного ZVS
500 Вт – 3 кВт (ККМ серверов, телеком)	Повышающий ККМ (65–100 кГц)	Безмостовой ККМ с «тотем-пол» топологией в режиме	Отсутствие Q_{rr} у GaN устраняет сквозные токи в полумосте,

		непрерывных токов (на GaN/SiC)	исключая диодный мост на входе.
3 кВт – 22 кВт (электротранспорт)	Мост с фазовым управлением (PSFB) на кремниевых IGBT/MOSFET	Двунаправленный резонансный CLLC / DAB на SiC	Симметричная передача энергии в обе стороны, мягкое включение ключей при шине 800 В.

Основные выводы, которые можно сделать при рассмотрении данной таблицы:

В диапазоне мощностей до сотен ватт базовым решением для сетевых адаптеров и телеком-модулей становится обратноходовой преобразователь с активным демпфированием (Active Clamp Flyback) и резонансный LLC, где небольшое мертвое время (dead-time) GaN-транзисторов позволяет сохранять режим ZVS во всем диапазоне нагрузок [10, 11, 14].

В каскадах коррекции коэффициента мощности (KKM) доминирующее положение заняла безмостовая схема «тотем-пол» (Totem-Pole PFC) в режиме непрерывной проводимости (CCM), обеспечивающая КПД выше 98,5-99% при вдвое меньшем количестве полупроводников в цепи протекания тока [11, 14].

В высоковольтных приложениях (бортовые зарядные устройства, преобразователи энергии на солнечных электростанциях) стандартом становятся двунаправленные схемы с фазовым управлением (DAB, CLLC) и трехуровневые инверторы (T-type, NPC), где применение SiC MOSFET позволяет сочетать киловольтные рабочие напряжения с мегагерцовым диапазоном коммутации [12, 13].

3.3. Влияние роста напряжений распределительных шин на схемотехнику ИИП

Эволюция топологий неразрывно связана с системным ростом рабочих напряжений первичных цепей. В современной силовой электронике наблюдается устойчивый переход к стандарту распределительных шин 800 В DC (тяговые батареи электромобилей, архитектуры питания высоконагруженных серверных стоек датацентров) [9]. Данный переход продиктован стремлением минимизировать омические потери проводимости.

Таблица 4 – Последствия перехода между двух- и трехуровневыми схемами

Критерий	3 уровневый ИИП (на Si 650 В)	2 уровневый ИИП (на SiC 1700 В)	Последствия перехода
Кол-во силовых элементов (на 1 фазу / полумост)	4 транзистора, 2 фиксирующих диода	2 транзистора, встроенные в транзисторы диоды	Уменьшение количества силовых элементов в 3 раза.
Количество каналов управления затворами	4 независимых драйвера	2 драйвера, не обязательно независимые	Сокращение площади печатной платы, необходимой для реализации ~в 2 раза.
Типичная рабочая частота	20- 50 кГц	100- 300 кГц	Повышение частоты в 3-6 раз снижает габариты

			и массу моточных узлов на 40-60%.
Сложность алгоритма управления	Высокая: требуется постоянный контроль и балансировка потенциала средней точки.	Низкая: классический двухтактный ШИМ с фиксированным мертвым временем	Отсутствие риска перекоса напряжений на ключах.
Нагрузка на изоляцию и ЭМС	Умеренная: к индуктивным компонентам прикладывается половина питающего напряжения.	Высокая: к индуктивным компонентам прикладывается полное питающее напряжение.	Требуются более жесткие меры по минимизации паразитных индуктивностей.
КПД преобразователя	96,5-97,5%	98,5-99,2%	Потенциальный переход от жидкостного охлаждения к радиаторам с воздушной конвекцией.
Сложность печатной платы	Высокая паразитная индуктивность из-за распределения 6 компонентов контура.	Потенциальная возможность создания контура коммутации с низкой паразитной индуктивностью	При грамотной топологии слоев можно нивелировать недостаток в ЭМС.

В эпоху доминирования кремния работа с подобными уровнями напряжений требовала либо применения IGBT с пробивным напряжением 1,7 кВ, частотный диапазон которых жестко ограничен единицами-десятками килогерц из-за значительного заряда рассасывания, либо использования элементов с пробивным напряжением 650 В с использованием трехуровневых топологий (Neutral Point Clamped (NPC), T-type), искусственно делящих шину питания пополам. Ценой такого решения становились удвоение числа транзисторов, усложнение схем драйверов и алгоритмов балансировки емкостного делителя. Именно поэтому системы такого класса вводились редко [3].

Появление современных карбид-кремниевых транзисторов с пробивным напряжением 1,7 кВ, а также прорыв в высоковольтных нитрид-галлиевых приборах (в частности, разработка интегральных GaN-переключателей на 1250-1700 В компанией Power Integrations [15-17]) позволили значительно упростить интеграцию систем с 800 В шиной:

Стало возможным возвращение к компактным двухуровневым топологиям (полный мост и его вариации) при сохранении частот коммутации в сотни килогерц, что снижает габариты системы.

Оптимизация маломощных вспомогательных ИИП: во вспомогательных блоках питания бортовых сетей электротранспорта и серверов появилась возможность вернуться к классическим обратноточным схемам, поскольку запас по напряжению ключей 1700 В

полностью перекрывает перенапряжения от индуктивностей рассеяния при шине 800-1000 В.

Сравнение последствий разобранного перехода сведено в таблицу 4 с соответствующими комментариями. В результате очевидно, что выбор между двухуровневой и трехуровневой топологиями при переходе на шину 800 В представляет собой компромисс между схмотехнической сложностью и паразитной динамикой ЭМС.

4. Текущие тенденции в проектировании ИИП на основе SiC и GaN

4.1. Разделение областей применения и границ применимости SiC и GaN

Анализ практических реализаций позволяет разделить области применения широкозонных приборов в зависимости от типа применяемого материала [3, 11, 14].

GaN HEMT демонстрируют превосходство в динамических характеристиках благодаря минимальному заряду затвора (Q_g) и выходной емкости (Q_{oss}). Это дает им существенное преимущество в диапазоне малых и средних мощностей (до 3-10 кВт), где первостепенны частоты коммутации и предельная плотность мощности: адаптеры питания, телекоммуникационные ИИП, распределенные преобразователи для серверных стоек и каскады низковольтных DC/DC-модулей [9, 11, 14].

SiC MOSFET напротив, занимают ключевые позиции в высоковольтных приложениях большой мощности (свыше 10-20 кВт, классы напряжений 1200-3300 В): зарядные станции электромобилей, преобразователи возобновляемой энергетики и системы распределения постоянного тока (HVDC).

4.2. Адаптация режимов модуляции и реактивных узлов к повышенным частотам

Рост рабочих частот в схемах на широкозонных полупроводниках (от 10-20 кГц в традиционных кремниевых приводах до 100-500 кГц в SiC-модулях и до 1-3 МГц в резонансных GaN-конвертерах) трансформирует подходы к расчету электромагнитных компонентов.

Практическое отсутствие заряда обратного восстановления у ключей рассматриваемых типов стимулирует отказ от работы в режиме непрерывных токов (CCM) с малыми пульсациями в пользу граничных режимов проводимости (BCM/TCM, Boundary/Triangular Conduction Mode). Допущение пульсаций тока свыше 100-250% относительно среднего значения обеспечивает естественное достижение условий мягкой коммутации (ZVS или даже ZCS) во всем диапазоне нагрузок. Хотя амплитудное значение тока через ключ возрастает, снижение габаритного объема моточных узлов в 2-4 раза компенсирует высокочастотные потери в сердечнике.

4.3. Многоуровневая интеграция: от кристалла до системного конструктива

Главным направлением преодоления паразитных эффектов на высоких di/dt и dU/dt , рассмотренных ранее, выступает концепция сквозной интеграции.

Переход от дискретных ключей к силовым интегральным схемам (GaN Power IC) и интеллектуальным силовым модулям (IPM). Монолитное объединение силового транзистора, логики сдвига уровней, схемы питания и затворного драйвера на одном кристалле снижает паразитную индуктивность контура затвора практически до нуля, предотвращая ложные срабатывания ключа при высоких dU/dt [18].

Применение бестрансформаторных и однокаскадных топологий, позволяет минимизировать или полностью исключить промежуточные звенья постоянного тока с ненадежными электролитическими конденсаторами высокой емкости.

Вытеснение традиционных объемных трансформаторов планарными магнитными компонентами, интегрированными непосредственно в структуру многослойных печатных плат (от 6 до 12 слоев). Концепция матричных трансформаторов (Matrix Transformers), распределяющих мощность между несколькими субтрансформаторами с печатными обмотками, обеспечивает низкий профиль источника питания, минимальную

индуктивность рассеяния и строго детерминированные паразитные емкости межобмоточной связи [19].

5. Эффективность, плотность мощности и системно-экономические аспекты

5.1. Баланс коэффициента полезного действия и плотности мощности

Как уже отмечалось, применение приборов на основе SiC и GaN снимает жесткие компромиссы, характерные для кремниевой схемотехники, обеспечивая одновременный рост как КПД (в среднем на 1,5-4 процентных пункта), так и объемной плотности мощности (в 3-8 раз) [3, 10, 14].

Вектор оптимизации современных преобразователей при этом разделяется в зависимости от целевого назначения системы:

Максимизация КПД. (серверные и телекоммуникационные ИИП). На повышенных частотах (100-250 кГц для SiC и 200-500 кГц для GaN) схемы безмостовой коррекции коэффициента мощности достигают пикового КПД на уровне 98,5-99,2%. Это позволяет выполнять требования жестких стандартов энергоэффективности, снижая тепловыделение в серверных стойках в 1,5-2 раза.

Максимизация удельной мощности. К данной группе можно отнести бортовые зарядные устройства электротранспорта, компактные сетевые адаптеры. Смещение рабочих частот в диапазон 500 кГц- 2 МГц дает возможность уменьшить габариты реактивных компонентов на 60-80% [10]. Несмотря на то, что на частотах выше 1 МГц суммарный КПД может снижаться до 95-97% из-за высокочастотных потерь в сердечниках и скин-эффекта в меди, плотность мощности достигает рекордных значений: свыше 2,5-5 кВт/дм³.

5.2. Системная экономическая целесообразность и совокупная стоимость владения (ТСО)

Очевидно, что на уровне закупки дискретных полупроводников SiC MOSFET и GaN НЕМТ по сей день сохраняют более высокую удельную стоимость из расчета на единицу коммутируемой мощности по сравнению с кремниевыми аналогами, однако на системном уровне действует эффект выравнивания совокупной стоимости спецификации материалов:

Кратное уменьшение габаритов дросселей и емкостей фильтров снижает затраты на точные изделия, медь и ферриты.

Снижение рассеиваемой тепловой мощности позволяет уменьшить площадь радиаторов, в некоторых случаях отказаться от жидкостного охлаждения в пользу воздушного либо ликвидировать принудительный обдув, что снижает прямые затраты на механику корпуса.

Для оборудования с непрерывным циклом эксплуатации (ЦОД, телекоммуникационные станции, зарядные хабы электротранспорта) решающую роль играет совокупная стоимость владения (Total Cost of Ownership, TCO). Расчеты [9] показывают, что сокращение рассеяния тепла на 2-3% в масштабах серверного дата-центра мощностью 10-50 МВт обеспечивает снижение как прямых затрат на электроэнергию, так и косвенных затрат на функционирование систем кондиционирования. В результате первоначальная разница в стоимости оборудования окупается в течение 1,5-3 лет эксплуатации.

Наглядной иллюстрацией преодоления ценового барьера служит потребительский сектор. Если ранее широкозонные полупроводники воспринимались исключительно как нишевое и дорогостоящее решение для аэрокосмической и специализированной техники, то сегодня технология GaN прочно закрепилась на массовом рынке компактных сетевых адаптеров питания (USB-PD мощностью 65-140 Вт и выше). За счет применения GaN-микросхем высокой степени интеграции (со встроенными драйверами и схемами защиты)

и снижения габаритов пассивных компонентов производителям удалось добиться паритета стоимости на системном уровне: GaN-зарядные устройства премиального и среднего сегментов заняли доминирующее положение, предлагая многократное превосходство по удельной мощности при сопоставимой с кремниевыми аналогами конечной цене.

6. Нерешенные схемотехнические проблемы: паразитная динамика, надежность и физические барьеры интеграции

6.1. Электромагнитная совместимость: фундаментальный компромисс быстродействия

Радикальное сокращение времени переключения в полупроводниках на основе SiC и GaN обостряет противоречие между энергетической эффективностью и электромагнитной совместимостью преобразователя. Экстремальные скорости изменения потенциалов и токов превращают паразитные емкости и индуктивности схемы в доминирующие источники помехоэмиссии:

Высокие dU/dt в узлах коммутации через паразитную емкость полупроводниковых приборов и радиаторов на корпусную землю порождают интенсивные токи смещения (Синфазные помехи (Common-Mode)). Это смещает спектр излучаемых и кондуктивных помех в диапазон 3-100 МГц, требуя применения многосвязных синфазных фильтров, экранирующих медных слоев в печатных платах и активных фильтров подавления ЭМС [20].

Противофазные помехи (Differential-Mode) в свою очередь индуцируются высокочастотными пульсациями тока во входных контурах и требуют применения специализированных конденсаторов с низким ESR и индуктивностью (ESL).

Попытка подавления этих явлений аппаратным замедлением переключения ключей (увеличением сопротивления затворного резистора R_g) возвращает систему к уровню динамических потерь традиционного кремния, нивелируя базовое преимущество широкозонных приборов.

6.2. Широкозонные полупроводники электроприводе и инверторах

Особый системный парадокс наблюдается при попытке прямого внедрения SiC и GaN в тяговые электроприводы и промышленные инверторы управления двигателями. В отличие от статических импульсных преобразователей (где индуктивности проектируются компактными и оптимизированы под высокие частоты), в системах электропривода нагрузкой выступает распределенная обмотка электрической машины:

Традиционные диэлектрики эмалированных проводов, из которых выполняется обмотка электродвигателей и пазовая изоляция статоров стандартизированы на воздействие импульсов с крутизной не более 5 кВ/мкс (5 В/нс). При коммутации широкозонных ключей со скоростями 20-100 В/нс в сочетании с волновым отражением в кабельной линии на первых витках обмотки формируется локальное двухкратное перенапряжение. Это провоцирует явление частичного разряда, быстро разрушающего органическую изоляцию и приводящего к межвитковому пробое.

Высокочастотные емкостные токи через подшипниковые узлы вызывают электроэрозионное разрушение дорожек качения.

В результате разработчики вынуждены интегрировать на выходе инвертора громоздкие dU/dt -фильтры. Масса, габариты и тепловые потери таких выходных фильтров зачастую полностью компенсируют выигрыш от снижения габаритов силовой части на WBG-ключях. Пока промышленность не перейдет на новые типы изоляционных компаундов двигателей с повышенной стойкостью к частичным разрядам либо на интегрированные концепции «мотор-инвертор» без длинных кабельных линий, повсеместное вытеснение кремниевых IGBT из регулируемого электропривода остается экономически и технически спорным [21].

6.3. Надежность кристаллов и аномальные режимы

Специфика кристаллической решетки и гетероструктур широкозонных полупроводников обуславливает новые типы отказов, не характерные для кремния:

Главным фактором нестабильности GaN HEMT выступает эффект динамического роста сопротивления открытого канала, вызванный захватом электронов на ловушки в объеме буферного слоя AlGaIn/GaN при высоком напряжении запирающего, а также практически полное отсутствие лавинной стойкости [3].

Уязвимым местом SiC MOSFET остается оксидный слой затвора. Из-за высокой плотности дефектов на границе раздела и повышенной рабочей напряженности поля оксид подвержен ускоренному старению. Кроме того, долгосрочная надежность встроенного паразитного диода ограничена дефектами упаковки кристаллической решетки [3].

Вследствие малой площади кристаллов и колоссальной плотности тока время выдержки короткого замыкания у SiC MOSFET снизилось до 1,5-3 мкс (против ~ 10 мкс у кремниевых IGBT), а у GaN HEMT составляет менее 200-500 нс. Это делает классические цепи защиты малоэффективными и требует внедрения сверхбыстрых датчиков тока на базе поясов Роговского или интегрированных в кристалл токовых сенсоров [3].

7. Перспективы развития и направления дальнейших исследований

7.1. Сверхширокозонные материалы (UWBG) и вертикальные GaN-структуры

Фундаментальным вектором эволюции компонентной базы силовой электроники выступает переход от широкозонных к сверхширокозонным материалам (Ultra-Wide Bandgap, UWBG).

Хорошим примером сверхширокозонных полупроводников может служить алмаз. Обладая шириной запрещенной зоны 5,5 эВ, он обеспечивает критическую напряженность электрического поля пробоя до 8-10 МВ/см (в разы выше, чем у SiC и GaN). Алмазные полупроводники характеризуются предельной теплопроводностью (2000 Вт/(м·К)), что снимает проблему локального теплового перегрева кристаллов при экстремальных мощностях [22, 23].

Вертикальные GaN-структуры, в отличие от рассмотренных ранее, переносят область максимальной напряженности поля вглубь кристалла. Это позволяет преодолеть барьер 650-900 В и создать ключи класса 1200-1700 В, сочетающие мегагерцовое быстродействие с токнесущей способностью в сотни ампер [24].

При этом перспективным промежуточным шагом выступает гибридизация полупроводников внутри одного устройства. В двухкаскадных преобразователях первичный высоковольтный каскад (например, ККМ или DC-звено) оптимизируется на базе 1200 В SiC MOSFET, а высокочастотный изолированный DC/DC-конвертер строится на 100-650 В GaN-модулях, обеспечивая своеобразный оптимум [7].

7.2. Новые магнитные материалы

Главным барьером на пути смещения рабочих частот ИИП в диапазон 3-10 МГц остается отставание магнитных материалов. Традиционные MnZn-ферриты демонстрируют лавинообразный рост удельных потерь в сердечнике из-за вихревых токов и гистерезиса. В связи с этим актуальными становятся исследования и синтез тонкопленочных нанокристаллических магнитомягких сплавов, низкопроницаемых высокочастотных NiZn-ферритов и композитных магнитодиэлектриков (Metal-Composite Flake Cores) [25].

7.3. Сквозное мультифизическое моделирование и методики ускоренных испытаний

Сверхвысокие скорости коммутации делают классическое раздельное проектирование малоприменимым для реального использования. Критическим направлением становится внедрение платформ сквозного мультифизического моделирования (Multiphysics Co-simulation). Такие среды объединяют анализ

электромагнитных полей в реальной 3D-топологии проводников, поведенческие SPICE-модели широкозонных полупроводниковых ключей с учетом температурной зависимости и тепловые модели конвекции/теплопроводности [26].

Наконец, фундаментальной научно-инженерной задачей остается разработка стандартизированных методик тестирования надежности. Стандарты, разработанные для кремниевых структур, не отражают специфику деградации широкозонных приборов [3]:

Требуется унификация методик измерения динамического сопротивления открытого канала при воздействии высокочастотных импульсных напряжений.

Необходимы новые протоколы ускоренных ресурсных испытаний с учетом деградации диэлектрика SiC под действием переменных импульсных перенапряжений затвора и явлений биполярной деградации.

Заключение

Проведенный анализ демонстрирует, что переход к широкозонным полупроводниковым приборам на основе SiC и GaN знаменует качественную трансформацию принципов проектирования импульсных источников питания. Превосходство физических свойств широкозонных материалов: предельной напряженности поля пробоя, высокой подвижности носителей и на порядки меньшие заряды затвора и обратного восстановления паразитного диода сняли фундаментальные частотные ограничения традиционного кремния.

Обобщение теоретических и практических результатов исследования позволяет сформулировать следующие ключевые выводы:

Полноценное раскрытие потенциала SiC и GaN невозможно в рамках классических схем с жесткой коммутацией. Рост частот в диапазон сотен килогерц и единиц мегагерц стимулировал массовый переход к топологиям с мягким переключением, позволившим преодолеть барьер КПД в 98,5–99% при многократном росте удельной мощности.

Появление высоковольтных ключей нового поколения (1200-1700 В SiC MOSFET и интегральными GaN IC) кардинально повлияло на топологический выбор для шин 800 В DC в электромобилях и центрах обработки данных. Это позволило отказаться от сложных трехуровневых структур (3-Level NPC) в пользу надежных и компактных двухуровневых каскадов, снизив компонентную сложность систем управления и драйверов.

Несмотря на сохраняющийся разрыв в стоимости единичных полупроводниковых кристаллов, достижение паритета совокупной стоимости спецификации материалов стало реальностью. Снижение затрат на охлаждение, сокращение габаритов моточных узлов и конденсаторов фильтров обеспечивают коммерческую целесообразность решений, что подтверждается доминированием GaN в массовом сегменте адаптеров питания и быстрой окупаемостью (1,5-3 года) в высоконагруженных промышленных системах и ЦОД.

Главными факторами, сдерживающими распространение широкозонных структур, остаются требования к электромагнитной совместимости, деградация изоляции моточных компонентов из-за частичных разрядов, а также малый запас стойкости к короткому замыканию, требующий принципиально новых подходов к диагностике и защите.

Дальнейшее развитие области импульсного электропитания связано с освоением вертикальных GaN-структур (v-GaN), сверхширокозонных полупроводников следующего поколения (алмаз), переходом к высокочастотным композитным магнитным материалам.

Список литературы:

1. Roberts S. DC/DC Book of Knowledge: Practical Tips for the User. – Gmunden: RECOM, 2021. – 305 p.
2. Roberts S. AC/DC Book of Knowledge: Practical Tips for the User. – Gmunden: RECOM, 2019. – 192 p.

3. Muhammad H. R. (Ed.). Power Electronics Handbook. 5th ed. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2024. – 1472 p.
4. Бондарь Д. Полупроводниковая микроэлектроника. Часть 3. Сверхширокозонные полупроводники как новый класс и этап развития полупроводниковых материалов и приборов // Электронные компоненты. – 2024. – № 11. – С. 57–66.
5. Levinshtein M., Rumyantsev S., Shur M. Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe. – New York: John Wiley & Sons, 2001.
6. Levinshtein M., Rumyantsev S., Shur M. (Eds.). Semiconductor Parameters. Vol. 1. – River Edge (NJ): World Scientific, 1996.
7. Cao Y., Ngô M., Yan N., Bai Y., Dong D., Burgos R., Agirman I. Design and Implementation of an 18-kW 500-kHz 98.8% Efficiency High-Density Battery Charger with Partial Power Processing // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. – 2021. – Pp. 1–31. – DOI: 10.1109/JESTPE.2021.3108717.
8. Aki L. Best of Power Tips: A Collection of Insights from Our Power Design Experts. – Dallas: Texas Instruments Inc., 2024. – 121 p.
9. Johnson J. E-mobility Power Conversion and Energy Storage Demystified: A Systems Approach [Электронный ресурс]. – URL: https://content.st.com/power-conversion-in-e-mobility-applications.html?icmp=tt47064_gl_inkon_nov2025 (дата обращения: 07.08.2026).
10. Yang B. Topology Investigation of Front-End DC/DC Converter for Distributed Power System. – Blacksburg: Virginia Tech, 2003. – 316 p.
11. Alatai S., Salem M., Ishak D., Das H. S., Alhuyi Nazari M., Bughneda A., Kamarol M. A Review on State-of-the-Art Power Converters: Bidirectional, Resonant, Multilevel Converters and Their Derivatives // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, no. 21. – Art. 10172. – DOI: 10.3390/app112110172.
12. Wei Y., Luo Q., Mantooth H. A. LLC and CLLC Resonant Converters based DC Transformers (DCXs): Characteristics, Issues, and Solutions // CPSS Transactions on Power Electronics and Applications. – 2021. – Vol. 6, no. 4. – Pp. 332–348. – DOI: 10.24295/CPSSTPEA.2021.00031.
13. Luh M., Blank T., Weber M. EV Chargers: Comprehensive Analysis of a 20 kW CLLC Converter Prototype for Vehicle-to-Grid (V2G) // Proc. PCIM Europe 2020, PCIM Europe Digital Days, 7–8 July 2020. – Pp. 1702–1709.
14. Nielsen M. R., et al. High-Power Electronic Applications Enabled by Medium-Voltage Silicon-Carbide Technology: An Overview // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2025. – Vol. 40, no. 1. – Pp. 987–1011. – DOI: 10.1109/TPEL.2024.3442483.
15. Varadarajan K., et al. Reliability Qualification of 1250 V Lateral GaN HEMTs for High-Reliability Industrial Applications // Proc. IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS). – 2025. – Pp. 3A2.1–3A2.6.
16. Varadarajan K., et al. Reaching Beyond 1200 V: Lateral GaN HEMTs for High-Reliability EV and Industrial Applications // Proc. PCIM Europe. – 2024. – Pp. 1593–1598.
17. Murukesan K., et al. State of the Art 1.7 kV Lateral GaN HEMTs, an Alternative to SiC // Proc. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – 2025. – Pp. 180–184.

18. GaN with Integrated Driver [Электронный ресурс] // Infineon Technologies AG. – URL: <https://www.infineon.com/products/power/gallium-nitride/gan-with-integrated-driver> (дата обращения: 7.09.2026).
19. Lin A., Chang H.-Y., Lai Y.-S. New Matrix Transformer for High Efficiency and Slim Form-Factor Power Converters // Proc. 2025 International Future Energy Electronics Conference (IFEEC), Bali, Indonesia, 2025. – Pp. 202–207. – DOI: 10.1109/IFEEC65025.2025.11301426.
20. Goyal V. K., Shukla A. Isolated DC-DC Boost Converter for Wide Input Voltage Range and Wide Load Range Applications // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2021. – Vol. 68, no. 10. – Pp. 9527–9539. – DOI: 10.1109/TIE.2020.3029479.
21. Divin S. GaN for Motor Control: High-Efficiency, Compact Inverters without Heatsinks [Электронный ресурс]. – URL: <https://content.st.com/gan-for-motor-control.html> (дата обращения: 07.08.2026).
22. Levinshtein M., Rumyantsev S., Shur M. Semiconductor Parameters. – River Edge (NJ): World Scientific, 1996. – Pp. 1–211.
23. Perez G., Maréchal A., Chicot G., Lefranc P., Jeannin P.-O., Eon D., Rouger N. Diamond Semiconductor Performances in Power Electronics Applications // Diamond and Related Materials. – 2020. – Vol. 110. – Art. 108154. – ISSN 0925-9635. – DOI: 10.1016/j.diamond.2020.108154.
24. Meneghini M., et al. Vertical GaN Devices: Reliability Challenges and Lessons Learned from Si and SiC // Proc. 2024 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), San Francisco, CA, USA, 2024. – Pp. 1–4. – DOI: 10.1109/IEDM50854.2024.10873536.
25. Zhang W., Su Y., Gilham D., Mu M., Li Q., Lee F. C. High Frequency High Current Point of Load Modules with Integrated Planar Inductors // Proc. 2014 IEEE 64th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), Orlando, FL, USA, 2014. – Pp. 504–511. – DOI: 10.1109/ECTC.2014.6897331.
26. Perabo F., Zadeh M. Multiphysics Modeling and Co-Simulation of Ship Electric Power and Propulsion Systems for Virtual Testing and Verification // IEEE Transactions on Transportation Electrification. – 2025. – Vol. 11, no. 1. – Pp. 5108–5121. – DOI: 10.1109/TTE.2024.3480009.

References:

1. Roberts S. DC/DC Book of Knowledge: Practical Tips for the User. Gmunden, RECOM, 2021. 305 p.
2. Roberts S. AC/DC Book of Knowledge: Practical Tips for the User. Gmunden, RECOM, 2019. 192 p.
3. Muhammad H. R. (Ed.). Power Electronics Handbook. 5th ed. Oxford, Butterworth-Heinemann, 2024. 1472 p.
4. Bondar D. Poluprovodnikovaya mikroelektronika. Chast' 3. Sverkhshirokozonnnyye poluprovodniki kak novyy klass i etap razvitiya poluprovodnikovyykh materialov i priborov [Semiconductor microelectronics. Part 3. Ultra-wide bandgap semiconductors as a new class and stage in the development of semiconductor materials and devices]. Elektronnye komponenty, 2024, no. 11, pp. 57–66.

5. Levinshtein M., Rumyantsev S., Shur M. Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe. New York, John Wiley & Sons, 2001.
6. Levinshtein M., Rumyantsev S., Shur M. (Eds.). Semiconductor Parameters. Vol. 1. River Edge (NJ), World Scientific, 1996.
7. Cao Y., Ngô M., Yan N., Bai Y., Dong D., Burgos R., Agirman I. Design and Implementation of an 18-kW 500-kHz 98.8% Efficiency High-Density Battery Charger with Partial Power Processing. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, pp. 1–31. DOI: 10.1109/JESTPE.2021.3108717.
8. Aki L. Best of Power Tips: A Collection of Insights from Our Power Design Experts. Dallas, Texas Instruments Inc., 2024. 121 p.
9. Johnson J. E-mobility Power Conversion and Energy Storage Demystified: A Systems Approach, available at: https://content.st.com/power-conversion-in-e-mobility-applications.html?icmp=tt47064_gl_inkon_nov2025, accessed 07.08.2026.
10. Yang B. Topology Investigation of Front-End DC/DC Converter for Distributed Power System. Ph. D. thesis, Virginia Tech, Blacksburg, 2003. 316 p.
11. Alatai S., Salem M., Ishak D., Das H. S., Alhuyi Nazari M., Bughneda A., Kamarol M. A Review on State-of-the-Art Power Converters: Bidirectional, Resonant, Multilevel Converters and Their Derivatives. Applied Sciences, 2021, vol. 11, no. 21, art. 10172. DOI: 10.3390/app112110172.
12. Wei Y., Luo Q., Mantooth H. A. LLC and CLLC Resonant Converters based DC Transformers (DCXs): Characteristics, Issues, and Solutions. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2021, vol. 6, no. 4, pp. 332–348. DOI: 10.24295/CPSSTPEA.2021.00031.
13. Luh M., Blank T., Weber M. EV Chargers: Comprehensive Analysis of a 20 kW CLLC Converter Prototype for Vehicle-to-Grid (V2G). Proc. PCIM Europe 2020, PCIM Europe Digital Days, 7–8 July 2020, pp. 1702–1709.
14. Nielsen M. R., et al. High-Power Electronic Applications Enabled by Medium-Voltage Silicon-Carbide Technology: An Overview. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, vol. 40, no. 1, pp. 987–1011. DOI: 10.1109/TPEL.2024.3442483.
15. Varadarajan K., et al. Reliability Qualification of 1250 V Lateral GaN HEMTs for High-Reliability Industrial Applications. Proc. IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS), 2025, pp. 3A2.1–3A2.6.
16. Varadarajan K., et al. Reaching Beyond 1200 V: Lateral GaN HEMTs for High-Reliability EV and Industrial Applications. Proc. PCIM Europe, 2024, pp. 1593–1598.
17. Murukesan K., et al. State of the Art 1.7 kV Lateral GaN HEMTs, an Alternative to SiC. Proc. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2025, pp. 180–184.
18. GaN with Integrated Driver, Infineon Technologies AG, available at: <https://www.infineon.com/products/power/gallium-nitride/gan-with-integrated-driver>, accessed 07.09.2026.
19. Lin A., Chang H.-Y., Lai Y.-S. New Matrix Transformer for High Efficiency and Slim Form-Factor Power Converters. Proc. 2025 International Future Energy Electronics Conference (IFEEC), Bali, Indonesia, 2025, pp. 202–207. DOI: 10.1109/IFEEC65025.2025.11301426.

20. Goyal V. K., Shukla A. Isolated DC-DC Boost Converter for Wide Input Voltage Range and Wide Load Range Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, vol. 68, no. 10, pp. 9527–9539. DOI: 10.1109/TIE.2020.3029479.
21. Divin S. GaN for Motor Control: High-Efficiency, Compact Inverters without Heatsinks, available at: <https://content.st.com/gan-for-motor-control.html>, accessed 07.08.2026.
22. Levinshtein M., Rummyantsev S., Shur M. *Semiconductor Parameters*. River Edge (NJ), World Scientific, 1996, pp. 1–211.
23. Perez G., Maréchal A., Chicot G., Lefranc P., Jeannin P.-O., Eon D., Rouger N. Diamond Semiconductor Performances in Power Electronics Applications. *Diamond and Related Materials*, 2020, vol. 110, art. 108154. ISSN 0925-9635. DOI: 10.1016/j.diamond.2020.108154.
24. Meneghini M., et al. Vertical GaN Devices: Reliability Challenges and Lessons Learned from Si and SiC. *Proc. 2024 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, San Francisco, CA, USA, 2024, pp. 1–4. DOI: 10.1109/IEDM50854.2024.10873536.
25. Zhang W., Su Y., Gilham D., Mu M., Li Q., Lee F. C. High Frequency High Current Point of Load Modules with Integrated Planar Inductors. *Proc. 2014 IEEE 64th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, Orlando, FL, USA, 2014, pp. 504–511. DOI: 10.1109/ECTC.2014.6897331.
26. Perabo F., Zadeh M. Multiphysics Modeling and Co-Simulation of Ship Electric Power and Propulsion Systems for Virtual Testing and Verification. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2025, vol. 11, no. 1, pp. 5108–5121. DOI: 10.1109/TTE.2024.3480009.