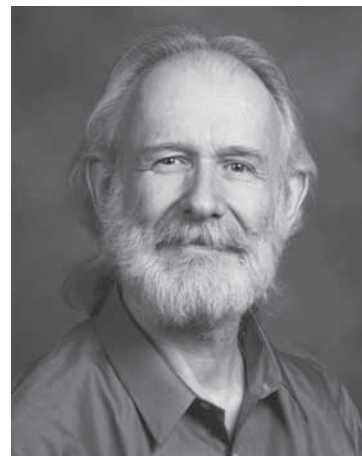


特集に寄せて

Power Semiconductors Enabling Energy Management

エネルギーマネジメントを可能にする パワー半導体

BOROYEVICH, Dushan, Ph.D. (Engineering)

University Distinguished Professor, Bradley Department of Electrical and Computer Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, U.S.A.
バージニア工科大学ブラッドリー電気コンピュータ工学部特別教授

Over the past 50 years, power electronics has played an increasing part in energy management for humanity. It is estimated that more than 30 % of energy consumed by humanity today is processed by electronic power converters. With the current trends of full industry automation, and increased electrification and automation of transportation and agriculture, as well as anticipated dominance of distributed generation from sustainable energy sources, it is predicted that in several decades 80 % of the global energy consumption will be in the form of electricity processed by power electronics.

Power semiconductors have been the main technology drivers of power electronics ever since the discovery of silicon controlled rectifier (SCR) in 1957, which is recognized now as an IEEE Milestone and celebrated every June 20th as the Power Electronics Day. SCRs, and derivative p-n-p-n silicon devices, are still used in the highest-power applications for energy management in electrical grids, like high-voltage direct current (HVDC) and flexible AC transmission system (FACTS), although they are being supplanted by high-voltage and high-current insulated gate bipolar transistor (IGBT) modules. Over the last 35 years, silicon IGBTs and p-i-n diodes have been the “workhorse” devices for the medium-voltage (600 V to 10 kV), medium-power (kilowatts to megawatts) applications, like motor drives and grid-connected converters for industry automation, commercial buildings, data processing centers, and transportation. At the low-voltage end (<300 V), silicon power metal-oxide-semiconductor field-effect transistors (MOSFETs) and Schottky diodes have dominated the power supply applications, with wide variety of circuit configurations and packaging structures. It is important to emphasize that silicon devices, as well as the diverse application-optimized packaging technologies, are being continuously perfected through numerous engineering innovations, both in academia and industry. This is enabling ongoing enhancements of

■和文翻訳（富士電機にて作成）

これまでの50年にわたり、人類にとってパワーエレクトロニクスは、エネルギーマネジメントにおける大きな役割を担っている。今日、人類が消費するエネルギーの30%以上は電力変換装置で処理されていると見積もられている。産業分野において完全自動化が進む中、輸送分野や農業などでも電化や自動化が進められている。さらには、持続可能なエネルギーを利用した分散発電が優勢となることが予想される。数十年後には、世界で消費されるエネルギーの80%は、電力としてパワーエレクトロニクス機器が処理するものと予想されている。

シリコン制御整流子（SCR）が1957年に世の中に出て以来、パワー半導体はパワーエレクトロニクス技術の主要なけん引役となってきた。なお、このことはIEEEマイルストーンとして認定され、毎年6月20日はパワーエレクトロニクスの日とされている。

SCRやこれから派生したp-n-p-nシリコンデバイスは、HVDCやFACTSなどの配電網における高出力用途のエネルギーマネジメントで今なお使われているものの、高電圧・高電流に対応したIGBTモジュールに置き換わりつつある。過去35年にわたり、産業の自動化、商業ビル、データ処理センター、輸送分野におけるモータ駆動装置やグリッド接続コンバータのような中電圧（600V～10kV）や中容量（kW～MW）の用途において、Si-IGBTやpinダイオードは主力パワーデバイスの役割を担ってきた。低電圧（<300V）では、さまざまな回路構成とパッケージ構造によりパワーSi-MOSFETとSBDが電源用途で主役を演じてきた。これらの中で、産学連携による多くの技術革新によって、シリコンデバイス技術およびさまざまな用途ごとに最適化されたパッケージ技術を継続的に作り上げてきたことは特筆すべきことである。このようにして、高効率化や高スイッチング周波数化、高電力密度化によってエネルギーマネジメントシステムは継続的に機能向上し、同時にデバイスの生産性や信頼性、ライフサイクルコストも改善してきている。

20年間待望されてきた炭化けい素（SiC）の縦型デバ

energy management systems by increasing efficiency, switching frequency and power density, while improving manufacturability, reliability and life cycle costs.

After two decades of anticipation, both vertical silicon carbide (SiC) and lateral gallium nitride (GaN) devices are becoming widely commercially available in the continuously increasing spectrum of voltage and current ratings. They are offering major reductions in losses and increases in switching frequencies and operating temperatures. However, the impact of these improvements at the system level is severely limited by the existing technologies for packaging and passive components (capacitors, inductors, transformers, conductors and insulators); requiring significantly increased investments in research and development. Additionally, the implementations of ancillary active electronic circuits, such as gate drives, sensors, controls, protection, and auxiliary power supplies, need radical re-thinking in order to assure dependable operation in the very high dv/dt , di/dt , and temperature environments. Hence, direct replacement of silicon with wide-bandgap devices in (otherwise unmodified) power converters would rarely result in appreciable benefits. For the highest impact, innovative circuits and energy management architectures, which are custom tailored to fully utilize the new wide-bandgap device potentials, will need to be developed. On the other hand, these new semiconductor materials are opening the opportunities of using high-frequency-switching power conversion in applications where it was not possible ever before.

In the low-voltage range, lateral GaN devices are already enabling operation at unprecedented switching frequencies, in the megahertz range. This trend will allow substantial improvements in power density and efficiency, as long as the corresponding improvements in passive components and packaging are materialized. Increased monolithic integration of ancillary active electronic circuits with power devices into Power

イスと窒化ガリウム (GaN) の横型デバイスは、電圧と電流の定格値の範囲を徐々に拡大しながら、商業的に広く使用されようとしている。両者とも損失量を大幅に低減し、スイッチング周波数と動作温度を上げている。しかしながら、これらの改善効果をシステムレベルにまで引き上げようとしても、現状ではパッケージングや受動部品 (コンデンサ、インダクタ、変圧器、導体、絶縁体) などの技術に限界がある。この既存技術の限界を打破するためには、研究開発への大幅な投資拡大が必要である。さらに、非常に高い dv/dt , di/dt , および高温環境化で高い信頼性を持った確実な動作とするために、ゲート駆動、センサ、制御、保護、補助電源などの付随する能動電子回路の実装に対して、思い切った見直しが必要になる。したがって、パワーコンバータのシリコンデバイスを単にワイドバンドギャップデバイスに置き換えるだけでは、目に見える恩恵を得ることはまずできない。最大効果を得るには、革新的な回路やエネルギーマネジメントのアーキテクチャを開発することによって、ワイドバンドギャップデバイスが持つ新たなポテンシャルを完全に活用できるようにする必要がある。一方で、これらの新しい半導体材料は、高周波スイッチングの電力変換をこれまでには考えられなかった分野で利用できる道を開きつつある。

低電圧領域では、GaN の横型デバイスでこれまでにないメガヘルツ帯のスイッチング周波数での動作が既に可能となっている。関連する受動部品やパッケージ技術が改善されれば、電力密度と効率の大幅な改善につながる。Si と GaN のいずれもパワーデバイスと付随する能動電子回路の両方をモノリシック化してパワー IC に集積すると、非常に大きな恩恵を大規模市場に与え続けることになるであろう。300 V から 1 kV のオフラインの用途では、近いうちに Si-pin ダイオードから SiC-SBD に完全に置き換わるであろう。一方、高電圧の GaN-HEMT と SiC-MOSFET は、コンバータのコスト、効率、サイズ、そして性能の観点から、Si スーパージャンクション MOSFET および IGBT から置き換わるのは容易ではないであろう。スイッチング周波数を 1 桁高くすることで恩恵が得られ

ICs – both Si and GaN – will continue to provide huge benefits in high volume markets. In 300 V to 1 kV (off-line) applications, SiC Schottky diodes will completely replace Si p-i-n diodes very soon. However, high-voltage GaN high electron mobility transistors (HEMTs) and SiC MOSFETs will have very hard time competing with Si super-junction MOSFETs and IGBTs based on converter cost, efficiency, size and performance! Only in applications that would benefit by an order of magnitude higher switching frequencies, the wide-bandgap devices could be a winner, provided better module and converter packaging, as well as magnetics technologies will be developed.

It could be expected that SiC could be overtaking Si within 3-5 years for 1-6 kV applications. Again, improved packaging for higher switching frequencies, higher voltages, higher temperatures, and longer lifetime will provide competitive advantage for SiC. Much improved energy management systems based on new designs for electrical machines, passives, and converters will be a “game changer.” For medium and high voltage (>6 kV) applications, SiC could be the future! Ability to operate at switching frequencies exceeding 20 kHz will define completely new approaches to electrical energy management in the megawatt power range. Very innovative packaging and passive component technologies, as well as new energy processing architectures will enable development of completely new power systems and applications. This will become huge when a new “electronic grid” will start to be built.

Papers in this issue provide some excellent examples of the described trends.

るような用途では、ワイドバンドギャップデバイスが優位となるが、これにはモジュールとコンバータパッケージングの改良、および磁性技術の開発が必要になる。

3～5年以内にSiCがSiを上回るのは、1～6kVの用途であると予想される。ここでも、高いスイッチング周波数、高電圧、高温、長寿命化に耐えるためのパッケージの改良がSiCに競争優位をもたらし、電気機械や受動部品、コンバータの新たな設計によって大幅に改良されたエネルギーマネジメントシステムが大きな変革を引き起こすであろう。中圧および6kVを超える高圧の用途では、将来SiCが主流となる。20kHzを超えるスイッチング周波数における動作は、メガワットレベルの電力における電気エネルギーマネジメントへのまったく新しいアプローチを可能にする。パッケージングと受動部品に革新技術を導入し、新しいエネルギー処理アーキテクチャが登場すれば、革新的な電力システムと用途の発展が可能になる。新しい“電子グリッド”の構築が始まると、この革新的な電力システムは極めて大規模なものとなる。

本特集の論文は、ここで述べたトレンドの優れた事例を紹介している。



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。