

大学の研究・動向

パワーエレクトロニクスからパワープロセッシングへ

工学研究科 電気工学専攻 先端電気システム論講座

教授 引原 隆士

講師 薄 良彦

助教 齋藤 啓子

特定助教 高橋 亮

1. はじめに

本研究室は2001年の発足以来、非線形力学、電力変換制御工学（パワーエレクトロニクス）、電気エネルギーネットワーク等に関連するシステム領域において、電気工学と他の分野との境界領域にある工学・物理システムも含めた研究を推進してきた。具体的にはマイクロからマクロまで様々なシステムのモデル化、解析、設計、制御、さらには実験による実証を行い、これに基づき次の展開を行っている。その中でもパワーエレクトロニクスは時代の要請もあって、重要な課題と捉え、従来の断続回路理論の域を超えた研究の方向性を模索してきた。本解説では、現在推進している研究テーマの中から表題に沿って研究室の研究動向を説明する。オン・ゴーイングの研究であるため経過説明的な表現となることをお許し頂きたい。

2. 新しいパワーデバイスの可能性

2-1 SiC パワーデバイスの物理的優位性

パワーエレクトロニクスは、1960年代に半導体素子が開発され、従来の真空管を半導体に置き換えたスイッチ駆動の実現が可能にした電力（パワー）変換と電力制御による産業応用分野である。比較的大きな容量の電力を扱える半導体素子をパワーデバイスと呼ぶ。電子デバイスと同様に、パワーデバイスも大容量化、集積化、高速化を目指した開発が続けられてきた。Siを半導体材料とするデバイスが産業界で利用されるデバイスのほとんどであるが、デバイス特性がその半導体材料の物理的理論限界にまで達するに及び、その限界を超えるための加工技術による構造上の工夫や新しい半導体材料の模索が続いて来た。その中でワイドバンドギャップ半導体の開発が注目され、SiC、GaNを用いたパワーデバイスが昨今市場に提供されるに至っている。本研究室において、2001年に引原が旧電力変換制御工学分野の教授に就任以来、COE21、GCOEのプログラム、複数の補助金の支援を受けて、いち早くSiCパワーデバイスの回路応用を実現するための研究を推進してきた。その経緯と現在の状況を以下に述べる。

SiCの回路応用を主張する時、2001年当時、産業界では従来のSi半導体パワーデバイスの置き換えを主眼とした開発目標が設定されてきた。Siパワーデバイスの物理限界を越える性能要求が無い時点で、デバイス置き換えによる省エネ・メリットの主張は、Si半導体デバイスが設備投資の意味からも廉価であることを考えるとほとんど期待できないということを多くの技術者は薄々感じていた。その中で筆者らは上記プロジェクトや講演、講義を通じてSiCパワーデバイスの回路応用に関する意識の変革を求めてきた。あれから10年、漸く筆者が続けて来た「SiCパワーデバイスの物理的優位性を生かした応用分野の創成」の主張が、産業界からも出始めるに至っている。2001年当時、新規参入者である著者

らの発表は、学会でも企業の物性関係の研究者からは歯牙にも懸けてもらえなかった。今ではその状況が懐かしい。

SiC 半導体パワーデバイスが Si 半導体パワーデバイスに比して持ち得る物理的優位性は、高耐圧、低オン抵抗、高速・高周波動作、耐高温特性である [1]。この半導体の開発は言うまでもなく京都大学大学院工学研究科電子物性工学専攻（（現）電子工学専攻）の松波弘之名誉教授に始まり、木本恒暢教授らの研究グループにより我国、世界をリードする研究開発が進められている。つい6月4日には20,000V 世界最高耐圧の PiN ダイオードの成果発表がなされたばかりである [2]。

半導体工学では、デバイスの開発は高耐圧や低オン抵抗に伴う大容量化に向けた方向性が設定されがちである。しかしながら、デバイスの耐高温特性、高速・高周波動作は回路実装の要でありながら、物性値以上には応用のための回路実装がなされてこなかった。同時に、パワーエレクトロニクスの分野では、負荷に合わせた回路設計が主体で、直接の目的の無い高温実装や RF 領域のスイッチングなどは全く意識の外にあったと言える。筆者らのグループではまず、デバイスの高速・高周波動作を目指すために、そのスイッチング損失による高温化に対するデバイスの耐性を確認するための研究を VBL の支援を受けて、舟木剛准教授（当時）、電子工学専攻・木本恒暢教授と共に米国 Arkansas 州立大学との共同研究で推進した。その結果、図 1 に示す様に、400°C においてもスイッチング動作が可能であることを示した [3]。これは期待されていた 250°C を遥かに越える、当時世界最高の温度環境での通常変換器動作を達成したものであった。この結果を受けて産業界で研究が進み、追試や同様の試みがなされた。産業利用のための課題は半導体チップそのものではなく、デバイス基盤、絶縁封止材（充填材）、パッケージなどの温度特性にあり、その後京都環境ナノクラスター事業を通じて、舟木剛教授（大阪大学）らを中心に新たに研究が進められている。筆者らは得られた高温特性に基づきスイッチング損失に基づく周波数余裕を評価し、数十 MHz のスイッチングでも十分にパワーデバイスとして利用できることと評価した。これが、SiC パワーデバイスの物理的優位性を活かす回路応用への道を開くこととなった。

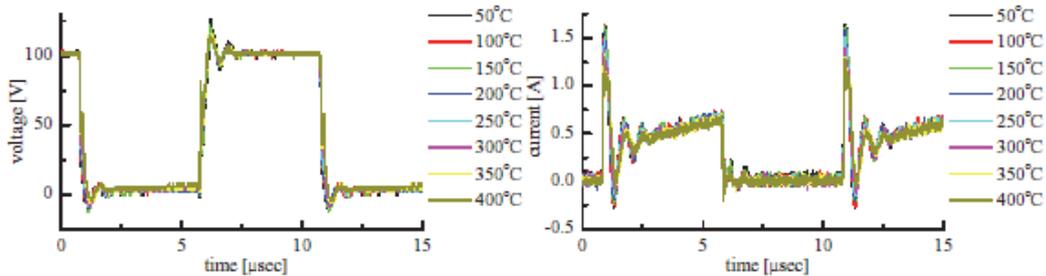


図 1 パワーデバイスの高温動作特性。

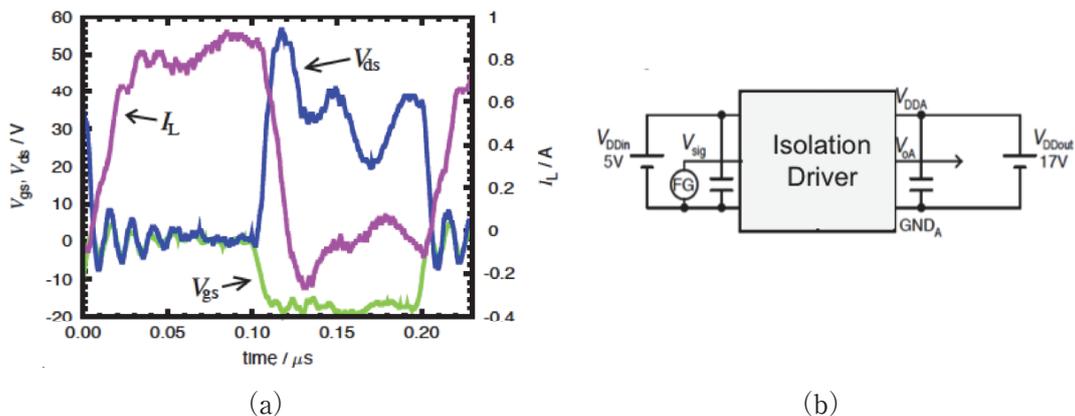


図 2 SiC-JFET による 5MHz のスイッチング波形 (図 (a))、および開発したノーマリーオン動作の JFET に疑似ノーマリーオフ動作を実現するゲートドライブ回路 (図 (b))。

2-2 SiC パワーデバイスの高周波応用

パワーデバイスの高速・高周波スイッチングへの要求は、Si 半導体ベースの現在のパワーエレクトロニクスの分野でさほどあった訳ではない。しかしながら、MHz を越えるパワーデバイスのスイッチング周波数を実現するために必要な技術の開発は、メーカーによる提供が当たり前と考えられているゲートドライブ回路の開発、集積化技術の向上ばかりでなく、パワー主回路における高周波特性の良いコンデンサの探索、パワー回路のインダクタの空芯化の実現といった受動素子の再考を促し、デバイスのキャパシタの低減、構造の再検討と言ったデバイス開発へのフィードバックも生む。

図2は、SiC-JFET による 5MHz のスイッチング波形、および開発したノーマリーオン動作の JFET に疑似ノーマリーオフ動作を実現するゲートドライブ回路を示している。この回路の開発は、JFET の不利な特性よりもその高周波特性を活かすことを求めた結果である [4]。この開発はその後の高周波駆動に道を開き、現在 SiC-JFET では 15 MHz を越えるスイッチングを実現している [5]。これが、ISM 周波数 (13.56MHz) を越えるスイッチング周波数であり、たとえば無線給電への適用などへの夢を膨らませ、産業界に「できる」という意識を与えたという点で非常に大きな意味がある。

図3は、SiC MOSFET を適用したフライバックコンバータの動作を示している。フライバックコンバータはノートパソコン用のアダプタ等に適用されている良く知られた変換回路である。SiC MOSFET の高周波ゲートドライバを検討し、MHz のスイッチング動作が可能であることを示している。その結果、実用コンバータ回路の小型化への可能性が示されたと同時に周辺も含めた問題点も明らかとなった [6]。

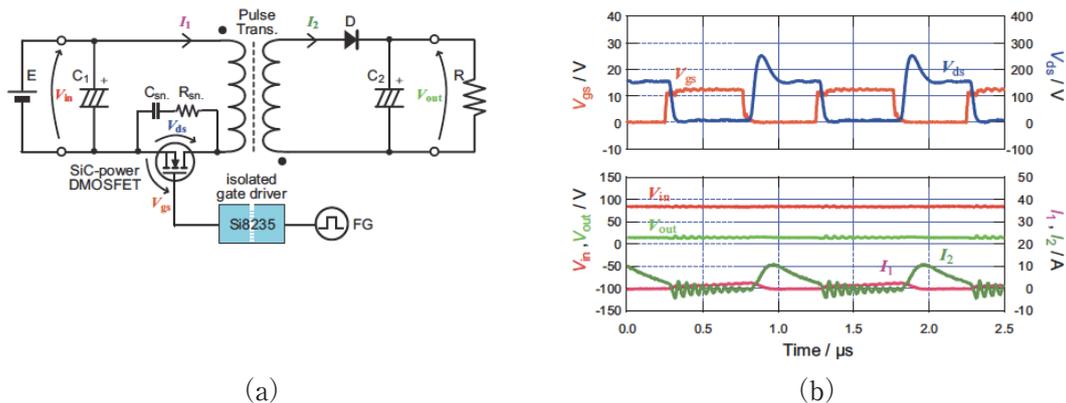


図3 SiC MOSFET を適用したフライバックコンバータ (図 (a)) とその動作波形 (図 (b))。

3. パワープロセッシングへ

さて、上記の流れは、既存のパワーエレクトロニクスの分野で物理的優位性を持つパワーデバイスが何を実現できるかを検討したものである。しかし、これは SiC パワーデバイスの新しい応用分野を切り開いているとはいえない。すなわち筆者らが主張する従来に世の中に無い分野を生み出したものではない。

筆者らのグループは、前節で説明した SiC パワーデバイスの高周波駆動特性に着目し、エネルギーと情報の統合技術 [7] の一つとして、電力 (パワー) を情報とともに処理するパワープロセッシングの技術への提案を行っている。この研究の考え方は現在、情報通信機構 (NICT) の受託研究において実現を図っている。その検討課題の一つとして取り上げている、電力をパケットで伝送する電力パケット伝送について以下説明する。これは今後スマートグリッド関連の電力マネジメント技術の一つとなることも期待される。

電力パケットのアイデアは 1990 年代に東北大学 豊田淳一教授 ((現) 名誉教授) が電力系統におい

てその可能性を提案されたと理解している [8]。残念ながら技術的に時期尚早で、Si パワーデバイスの特性も不十分、情報系や通信系の技術も未熟、さらに提案の必然性もなく忘れ去られていた。筆者らは SiC のパワーデバイスの特性評価およびその回路実装の技術的裏付けに基づいてこの研究提案に注目し、高周波スイッチングが可能な変換回路自体がそのスイッチングにより伝送する電力にタグ付けすることができることを示し、電力伝送を実証した [9]。同様の考えは交流電力に電力線通信を重畳し、擬似的なパケットを形成することによっても実現することを実証した [9, 10]。2011 年 3 月に東日本大震災が発生し、その後の電力事情の大きな変化の中で、いろいろな研究者から同様な意見が出てきている。多くの方に不可欠な電力ネットワークのあり方に、分散系としてロバストであった情報ネットワークの考えが入らないかという思いがあるものと思われる。残念ながらそれらの多くは、物理的に実現する手段を伴っておらず、現実に今電力をどうするかという場面において責任を持った提案とはなっていない。その意味でも大学における研究や提案は、明確な技術論と手法論の上に学問領域として電気電子工学の全ての技術の統合の中で確立する必要がある。

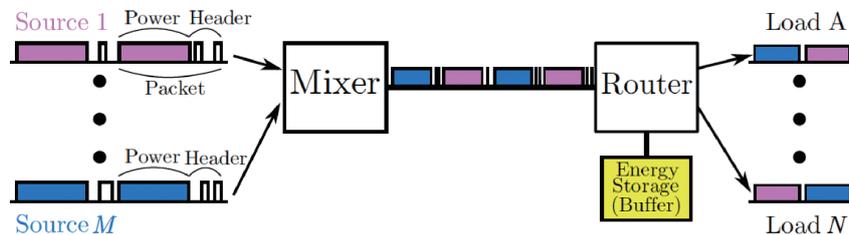


図 4 電力パケット伝送系の概念図

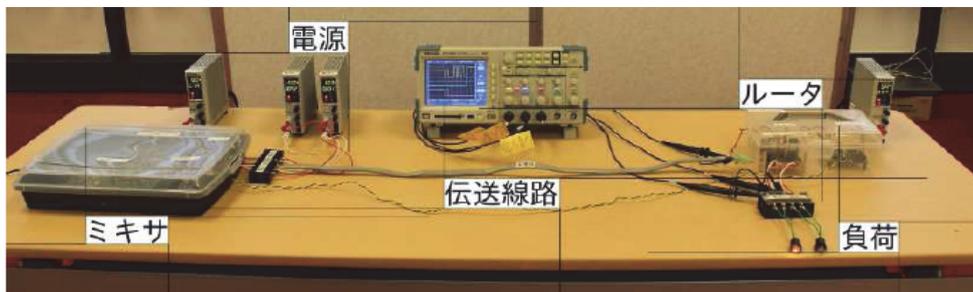


図 5 電力パケット伝送系のデモ

図 4 に電力パケット伝送系の概念図を示す。図 5 は複数電源の電力をパケット化しタグ付けし、複数の負荷に時分割同一配電線を介して配電できることを実験的に確認するデモの写真である。このスイッチ素子として SiC JFET を用いている。このようなスイッチ回路は通信系のミキサーやルーターの機能を持つものに相当し、損失があっては意味が無い。SiC パワーデバイスの適用はその低損失を実現し、パワー回路であっても集積化を可能にすることが期待される。パワーを情報と同時に処理することで物理的同一性を担保する、これまでに無いパワープロセッシングの考え方である。

電力のパケット化が何を生み出すかを従来技術の範囲で議論しても意味はない。デジタル通信が出てきた時には、それらは成熟したアナログ通信技術から見て十分であったとは言えない。その時点でデジタル通信の今の様な繁栄を正確に予測できていた人はそう多くないであろう。同様と言えるかどうか分からないが、電気工学の技術の歴史を眺めた時電力パケットの化の提案は必然と考えられる。

4. おわりに

従来の電力制御として電圧、電流波形の生成を目標とするパワーエレクトロニクスではなく、その電力自体が情報を持つパワープロセッシングの提案は、関連分野にゲームチェンジを生むと同時にパラダイムシフトを引き起こす可能性がある。若い人にはその様な夢をリアルに描いて示すことが重要である。研究者として常識や完成された理論に常に疑問を持ち、今後も限界を超えると同時に、そこから見えてくる新しい分野の創造に向けて研究を進めて行きたい。

謝辞：本研究は、研究推進の期間に研究室から巣立った若手研究者、博士、修士課程学生に負うところが多大である。舟木剛先生（現 大阪大学・教授）、佐藤宣夫先生（現 千葉工業大学・准教授）、博士課程を修了された Dr. Nathabhat Phankong、宅野嗣大博士、修士課程を修了された学生の方々にこの場を借りて謝意を表します。また、現在研究室において関連研究を推進頂く大学院生の方々にも感謝します。また日頃、有意義な意見を頂戴する木本恒暢教授（電子工学専攻）には、この場を借りて御礼申し上げます。最後に、デバイスを提供頂くとともに、研究に協力頂いた 住友電気工業（株）、（株）ローム に御礼申し上げます。最後に、本関連研究は COE21、GCOE、科学研究費補助金、環境ナノクラスター事業、NICT の研究助成を受けたものであることを記します。

文献

- [1] 松波弘之, 半導体 SiC 技術と応用, 日刊工業新聞社 (2003).
- [2] http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/news_data/h/h1/news6/2012/120604_1.htm
- [3] T. Funaki, J. C. Balda, J. Junghans, A. S. Kashyap, H. A. Mantooth, F. Barlow, T. Kimoto, and T. Hikihara, "Power Conversion With SiC Devices at Extremely High Ambient Temperatures", *IEEE trans. on Power Electronics*, Vol.22, No.4, pp.1321-1329 (2007).
- [4] T. Takuno, T. Hikihara, T. Tsuno, S. Hatsukawa, HF Gate Drive Circuit for a Normally-On SiC JFET with Inherent Safety, 13th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2009), Barcelona Spain, Sep.8-10 (2009).
- [5] T.Takuno, High Frequency Switching of SiC Transistors and its Application to In-home Power Distribution, *PhD dissertation*, Kyoto University, March (2012).
- [6] 佐藤 宣夫, 文野 貴司, 大嶽 浩隆, 中村 孝, 引原 隆士, SiC 製 DMOSFET を用いた絶縁型フライバックコンバータの 1MHz スイッチング動作, 平成 24 年電気学会全国大会, 4-158, 広島工業大学 (2012).
- [7] 情報処理, 特集「エネルギーの情報化」, Vol.51, No.8 (2010).
- [8] 斎藤浩海, 宮森敏, 島田亘, 豊田淳一, 開放型電力ネットワークにおける自律分散的電力流通を実現する機構の基礎検討, *電学論誌*, Vol.117-B, No. 1 (1997).
- [9] T. Takuno, M. Koyama, T. Hikihara, In-home Power Distribution Systems by Circuit Switching and Power Packet Dispatching, 1st IEEE International Conference on Smart Grid Communications, 4-6 Oct., Maryland, USA (2010).
- [10] T. Takuno, Y. Kitamori, R. Takahashi, and T. Hikihara, AC Power Routing System in Home Based on Demand and Supply Utilizing Distributed Power Sources, *Energies*, 4 (5), 717-726 (2011).