

修士学位論文要約（令和4年3月）

GaN on Si パワーデバイスを用いた高効率で小型・高速応答が可能な POL コンバータに関する研究

干川 凱生

指導教員：遠藤哲郎

Study on High Efficiency, Compact and High-Speed Response POL Converter with GaN on Si Power Device

Gaiki HOSHIKAWA

Supervisor: Tetsuo ENDOH

Due to the trend toward lower voltage and higher current in MPUs, POL converters are required to have characteristics such as small size, high efficiency, and fast response. GaN on Si devices are next-generation semiconductors consisting of GaN grown on Si substrates and are expected to be used in high-frequency applications due to their high-speed switching characteristics when compared to Si and other materials. GaN on Si also has a smaller characteristic on-resistance ($R_{on} \cdot A$) than Si. In this study, GaN on Si is used as the power device of POL converter to achieve small size and high efficiency. To confirm the high efficiency of GaN on Si at high-frequency operation, the power conversion efficiency was measured, and in addition, the size of the power device and inductor were measured. The results confirmed that the system can achieve high performance in terms of efficiency and size. On the other hand, POL converters are also required to have a high-speed response to load fluctuations. To achieve this, it is possible to reduce the smoothing inductance by further high-frequency operation and to adopt a control method that enables a high-speed response.

1. はじめに

近年の半導体プロセスの微細化に伴って MPU の動作電圧は低下しており、MPU の許容電圧範囲は狭くなっている(図1 参照)。その一方で MPU などの負荷デバイスに流れる電流は MPU の駆動電圧低下と計算量の増大に伴って増加しており、消費電力量は大幅に増加している。MPU などに電力を供給する POL コンバータには、電力変換効率の向上、出力電圧範囲を精度よく一定の範囲に抑制する、といった課題があり、加えて、MPU に対して近接配置する必要性から小型化も課題となる。これらの課題に対して本研究ではワイドバンドギャップ半導体である GaN on Si (Gallium Nitride:窒化ガリウム)を POL コンバータのパワーデバイスに採用することで高効率かつ小型な POL コンバータを検討した。

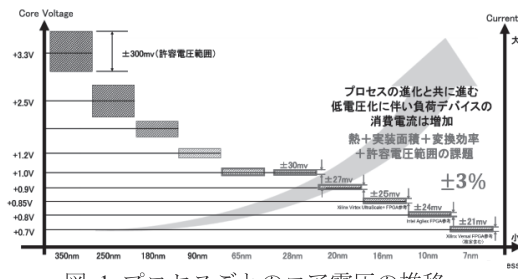


図1 プロセスごとのコア電圧の推移

2. GaN on Si 適用による小型化・高効率化

GaN on Si デバイスは Si 基板の上に GaN を成長させたパワー半導体デバイスである。GaN on Si デバイスはその電気的特性・デバイス構造から、高速スイッチング可能・低い $R_{ON} \cdot A$ という特徴を有している。

小型化という点に注目すると、低い $R_{ON} \cdot A$ から実現できる GaN on Si デバイス自身の小型化に加え、この GaN on Si の高速スイッチング（高周波動作）によってインダクタのサイズを小さくすることができる。

高効率化という点に注目すると、高速スイッチングによる短い立ち上がり時間、立ち下がり時間はデバイスのスイッチング損失の低減につながる。加えて、Si にはボディダイオードがオン状態からオフ状態に移移するときに発生する損失である逆回復損失が存在するが、GaN on Si にはボディダイオードが存在しないため、逆回復損失はゼロになる。

3. POL コンバータの電力変換効率測定結果

電力変換効率は POL コンバータの主要な性能指標の一つである。効率が高くなると発熱量が減り、冷却機器などのサイズを縮小でき、コストの削減にもつ

ながら。

パワーデバイスに耐圧とオン抵抗の近い GaN on Si パワーデバイス EPC2014C²⁾と Si パワーデバイス FDS4672A³⁾を選定し、Si POL と GaN on Si POL の効率比較を行った。GaN on Si の高周波動作性を確認するため、スイッチング周波数が 0.5,1,2,4MHz のときの効率-出力電流特性を測定した。平滑インダクタのインダクタンス値はデバイスの動作周波数を考慮して Si MOSFET で 1000nH⁴⁾、GaN on Si で 150nH⁵⁾とした。ハイサイドとローサイドのスイッチが同時に ON になり貫通電流が発生しないようデッドタイムを設け、Si MOSFET で 20ns、GaN on Si で 2ns に設定した。

この POL の測定条件としては、5V の入力電圧の条件にて出力電圧の目標値を 0.9V として、パワーデバイスの定格電流や動作温度を考慮して、電子負荷で出力電流を 0-8A に変化させたときの効率-出力電流特性を測定した。既存の Si MOSFET POL は電流を大きくしていくと、所定のパルス波形を維持できず出力電圧を一定に保てなくなったため各周波数における限界の電流値までの効率を測定した。当該限界電流値はスイッチング周波数を上げていくほど小さくなり、4MHz では 0A の負荷電流条件でも出力電圧を維持できなかった。

電力変換効率の測定結果を表 1 に示す。電力変換効率を測定したところ、パワー回路部から制御 IC への電流の引き込みなどにより効率の低下が発生したため、効率の補正を行った。Si MOSFET では 500kHz で、GaN on Si では 2MHz から 4MHz で 80%以上の要件を満たした効率を得られた。Si MOSFET POL は電流を大きくしていくと、出力電圧を一定に保てなくなったが、GaN on Si POL は測定条件範囲内で出力電圧を維持できており、8A までの効率を測定できた。また、Si MOSFET と比較してスイッチング周波数が低いときよりも高いときのほうが効率は高く、GaN on Si の高周波動作時における高効率特性が確認できた。

表 1 POL コンバータ効率測定・補正結果

| fsw[Hz] | Si POL | | GaN on Si POL | |
|---------|--------|-------|---------------|-------|
| | 補正前 | 補正後 | 補正前 | 補正後 |
| 500k | 71.1% | 80.0% | 65.6% | 72.0% |
| 1M | 66.0% | 75.0% | 69.6% | 79.2% |
| 2M | 56.7% | 62.7% | 70.9% | 82.4% |
| 4M | - | - | 69.8% | 81.9% |

4. POL コンバータのパワーデバイスとインダクタのサイズ比較結果

GaN on Si は低い $R_{ON} \cdot A$ という特徴を有しており、これによって GaN on Si デバイス自身の面積

は Si と比較して小さくなる。更に、GaN on Si の高周波動作によって平滑インダクタのインダクタンス、ひいてはサイズを小さくすることができる。

Si POL コンバータのサイズにおいて大きな割合を占めていたパワーデバイスとインダクタのサイズに関して、GaN on Si 適用による小型化の評価を行った。図 2 に Si、GaN on Si POL コンバータのサイズの比較画像を示す。Si と比較したときの低い $R_{ON} \cdot A$ によるデバイス自身の小型化を確認することができた。また、高周波動作性によって平滑インダクタのインダクタンス、ひいてはインダクタのサイズを削減することができ、インダクタの小型化を確認できた。

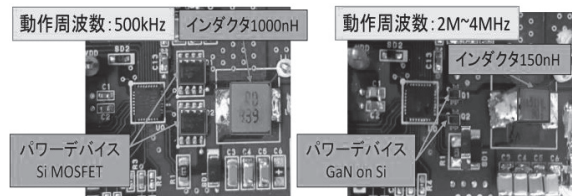


図 2 POL コンバータのサイズ比較

5. まとめ

GaN on Si パワーデバイスを適用した POL コンバータを開発し、従来の Si POL コンバータに比べ 2MHz、4MHz での高周波動作が可能で、効率、サイズにおいて高い性能を発揮できることが確認できた。本技術は今後の情報化社会におけるサーバーなどの低消費電力化、実装面積の削減に対し大きく貢献できるものと考えられる。

一方で POL コンバータには負荷変動に対する高速応答性も求められる。これを実現するためにはさらなる高周波動作化による平滑インダクタンスの低下や高速応答可能な制御方式の採用が考えられる。

文献

- 1) Alex Lidow, Michael de Rooij, Johan Strydom, David Reusch, John Glaser, "GaN transistors for efficient power conversion", John Wiley Sons Ltd, 2nd edition, 2015.
- 2) EPC, EPC2014C datasheet, Revised April 2021
- 3) ON Semiconductor, FDS4672A datasheet, Rev C1(W)
- 4) 0830CDMCC/DS datasheet, Ver. 2021-03-05
- 5) PA4345.151NLT datasheet, P772.O (09/20)