

ワイドギャップパワー半導体の高速ゲートドライブ技術 ~インダクタによる SiC 向け MHz 動作ゲートドライバと GaN 集積回路~ Current Source Gate Driver for SiC and Monolithic Integrated GaN Circuit

長尾 詢一郎, 山下 夕貴, 古田 潤, 小林 和淑

J.Nagao, Y.Yamashita, J.Furuta, K.Kobayashi

京都工芸繊維大学

Kyoto Institute of Technology

Email: jnagao@vlsi.es.kit.ac.jp

概 要

本稿ではワイドギャップ半導体を高速駆動するゲートドライバを提案し、実機による動作確認を行い、その高速駆動性能を確認したので報告する。SiC パワーMOSFET は内部ゲート抵抗が大きいいため、高速駆動するためには短時間で大きなゲート電流を SiC パワーMOSFET の入力容量に供給することが必要である。インダクタを電流源として動作させることで、SiC パワーMOSFET を高速に駆動することを確認した。従来手法であるパワーデバイスをディスクリート型ゲートドライバで駆動する方法は、寄生成分によりスイッチング速度が制限される課題が存在する。横型の E-mode GaN on SOI 技術を用いた GaN パワー HEMT とゲートドライバを 1 チップに単一集積し、寄生成分を最小限に抑えることで、10 MHz での高速スイッチング動作を実現した。

1. はじめに

電気自動車やドローンなどに用いられる電力変換回路は小型軽量化が要求される。スイッチング周波数を上げることで、電力変換回路内の受動素子のサイズを小型化できる。電力変換回路を高周波動作するためには電力変換回路内のパワーデバイスを高速に駆動するゲートドライバが必要となる。従来の Si (シリコン) に比べてワイドギャップ半導体である SiC (炭化ケイ素) や GaN (窒化ガリウム) を用いたパワーデバイスは高速動作が可能であるため、SiC MOSFET や GaN HEMT (High Electron Mobility Transistor) の電力変換回路への応用が検討、実用化されている[1]。しかし、従来型ゲートドライバでは SiC パワー MOSFET の高い内部ゲート抵抗によりゲート電流が低減され、SiC パワーMOSFET の高速駆動性能を十分に引き出せていない。ディスクリート型ゲートドライバで GaN HEMT を駆動する従来手法では、寄生成分によりスイッチング速度が制限される。本稿ではこれらのパワーデバイスを高速に駆動する手法を提案し、それぞれについて評価を行ったところ、その有用性を確認したので報告する。

2. インダクタを用いた電流源型ゲートドライバ

SiC パワーMOSFET は従来の Si パワーMOSFET に比べて、高速駆動が可能であるほか、Si パワー MOSFET の約 1/600 倍の低いオン抵抗、高い絶縁破壊強度をもつため、電力変換回路への応用が実用化が進んでいる[2]。しかし、SiC パワーMOSFET は、ゲートドライバ IC の出力抵抗 R_{out} の数倍から数十倍程度の大きな内部ゲート抵抗 R_{in} が存在する。これにより、ゲート電流が制限されるため、従来型である抵抗型ゲートドライバによる駆動法はスイッチング速度が遅くなるという課題が存在する。SiC パワー MOSFET の持つ高速駆動性能を十分に引き出すためには、大きなピーク値を持つ電流で SiC パワー MOSFET の入力容量を充放電することが必要となる[3]。

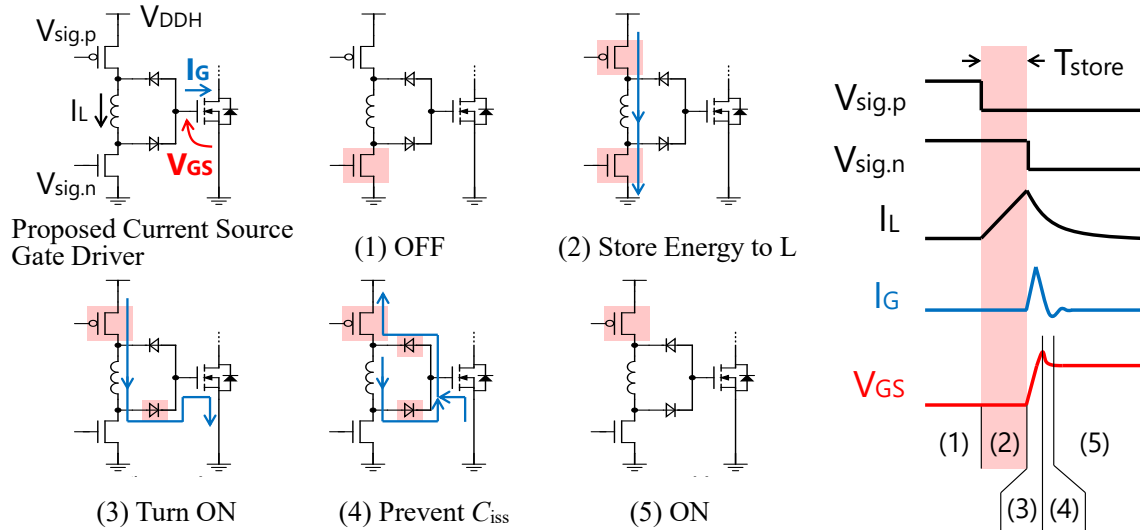


Fig. 1: Operation Principle at Turn ON of Proposed Current Source Gate Driver.

この高速駆動要件を満たすために、インダクタを用いた電流源型ゲートドライバを提案した[4]。スイッチング前にインダクタに磁気エネルギーを蓄積することで、スイッチング時に電気エネルギーとしてインダクタから大きなピーク値をもつ電流を入力容量 C_{iss} に供給する。これにより高い内部ゲート抵抗を介しても高速スイッチングが可能となる。提案した電流源型ゲートドライバの回路図とターンオンの動作原理を図1に示す。図1 (1)のオフ状態の後、(2)で青矢印に沿って電流が流れ、インダクタに磁気エネルギーが蓄積される。(3)では蓄積した磁気エネルギーを電気エネルギーとして電流を放出し、パワーMOSFET の C_{iss} を高速に充電する。 V_{GS} が V_{DDH} を超えるとハイサイド側のダイオードがオンし、入力容量から電荷を放出することで、入力容量の過充電を防止する(4)。(5)では V_{GS} が V_{DDH} に落ち着き、オンする。

従来の抵抗型ゲートドライバ (Conventional)と提案型ゲートドライバ (Proposed)のスイッチング特性の比較をダブルパルス試験 (DPT)により行った[4]。SiC パワーMOSFET はローム社製の SCT2450KE ($R_{in} = 25 \Omega$)を用いた。従来型ゲートドライバは Si. Labs 社製の Si 8234BB ($R_{out} = 1 \Omega$)を用いた。提案型のインダクタは 79 nH のチップインダクタを使用した。実装したスイッチング特性測定回路を図2に示す。

図3に V_{GS} と V_{DS} の実測波形を示す。赤色の波形が従来型、青色の波形が提案型を用いた場合の結果である。実測結果より提案型の高速駆動性能を確認した。従来型のターンオフ時間 t_{off} 、ターンオン時間 t_{on} はそれぞれ 18 ns と 31 ns であった。提案型の t_{off} 、 t_{on} はそれぞれ 15 ns と 20 ns となり、 t_{off} は 17%、 t_{on} は 35%スイッチング時間が改善された。この結果より、提案した電流源型ゲートドライバの MHz 級の高速駆動性能が確認された。

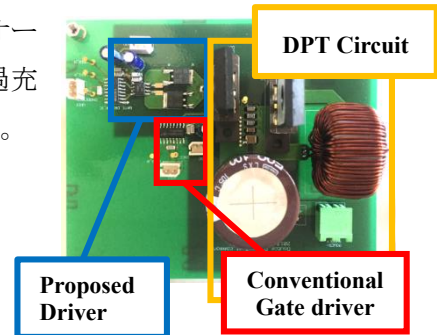


Fig. 2: Switching Test Board.

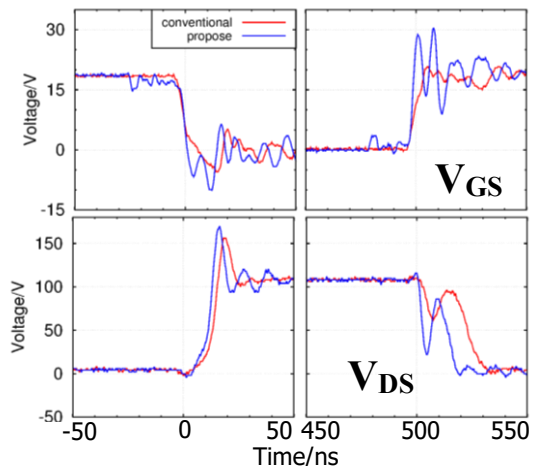


Fig. 3: Measurement waveform

3. GaN 集積回路

GaN HEMT は高い移動度を持つ二次元電子ガス (2DEG) をチャネルとして利用するデバイスであり、SiC MOSFET に比べて、より高速動作が可能なデバイスである。オン抵抗は Si MOSFET の約 1/940 倍であるため損失が小さく、主に高周波用途への応用が期待されている。しかし、従来手法であるパワーデバイスをディスクリート型ゲートドライバで駆動する方法は、配線やボンディングによる寄生成分によってスイッチング速度が制限されてしまうため、GaN HEMT の高周波特性を十分に引き出せない (図 4(a))。一方、横型の GaN HEMT はプロセス上で Insulator によるデバイス間の絶縁分離が可能であるため、パワー GaN HEMT と GaN ゲートドライバの単一集積化が可能であり、寄生成分を最小限に抑えることが可能である (図 4(b)) [6]。本研究では、GaN on QST® プロセス (図 5) を採用し、横型の E-mode p-GaN ゲートパワー HEMT と提案したゲートドライバを 1 チップに単一集積した (GaN IC) [7]。GaN IC の回路図を図 6 に示す。提案したゲートドライバは 2 段のインバータでパワー HEMT を駆動する構成であり、段階的に HEMT のサイズを大きくすることで、高速にパワー HEMT の入力容量を充放電する。ブートストラップ回路を用いることで 1 つの電圧源で動作可能である。設計した GaN IC のレイアウトを図 7 に示す。パッケージは DIL18 パッケージを採用した。

GaN IC と従来手法による単体パワー HEMT のスイッチング特性の比較を行った (図 8、9)。単体パワー HEMT は、FIB 加工を GaN IC に施すことでメタル配線を切断し、GaN IC 内のゲートドライバの影響を受けずにスイッチング特性を得られるようにした。単体 HEMT を駆動するディスクリート型ゲートドライバは MAX5048 を用いた。供給電流は負荷抵抗 R_{load} の両端の電圧を測定し、負荷抵抗の値で割ことで得た。

図 10 に供給電圧が 100 V、負荷抵抗が 25 Ω 、スイッチング周波数が 10 MHz の場合の実測波形を示す。実測結果より、GaN IC の高速駆動性能が確認でき、10 MHz での動作を実現した。評価結果は、従来手法のスイッチング時間 t_{off} 、 t_{on} はそれぞれ 6.2 ns、4.0 ns となった。GaN IC のスイッチング時間 t_{off} 、 t_{on} はそれぞれ 1.8 ns、2.6 ns であり、 t_{off} は 71%、 t_{on} は 35% スwitching 時間が改善された。1 周期あたりのパワー HEMT での損失は従来手法が 0.95 $\mu\text{J}/\text{cycle}$ 、GaN IC は 0.82 $\mu\text{J}/\text{cycle}$ となり、高速スイッチングによるスイッチング損失の低減により 14% スwitching 損失が改善された。

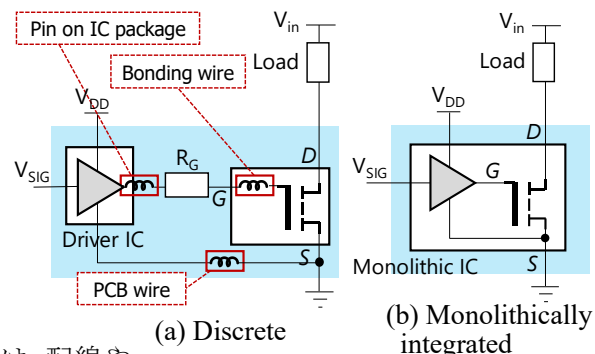


Fig. 4: Gate drivers.

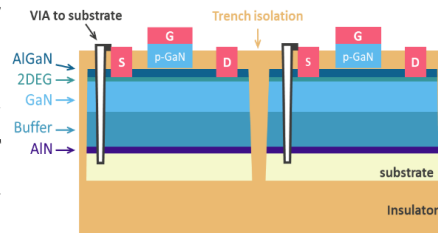


Fig. 5: GaN on QST® process.

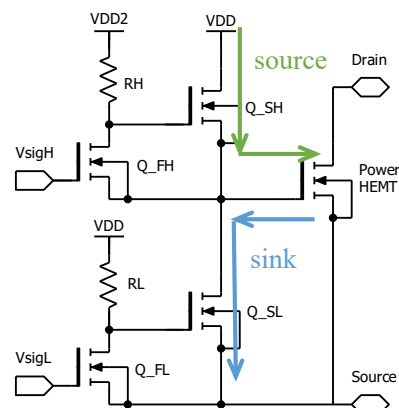


Fig. 6: Proposed monolithic GaN IC.

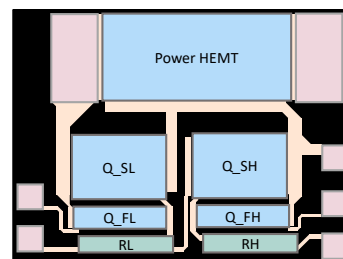


Fig. 7: Layout of GaN IC.

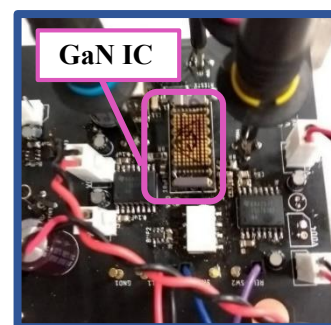


Fig. 8: Switching test board for GaN IC.

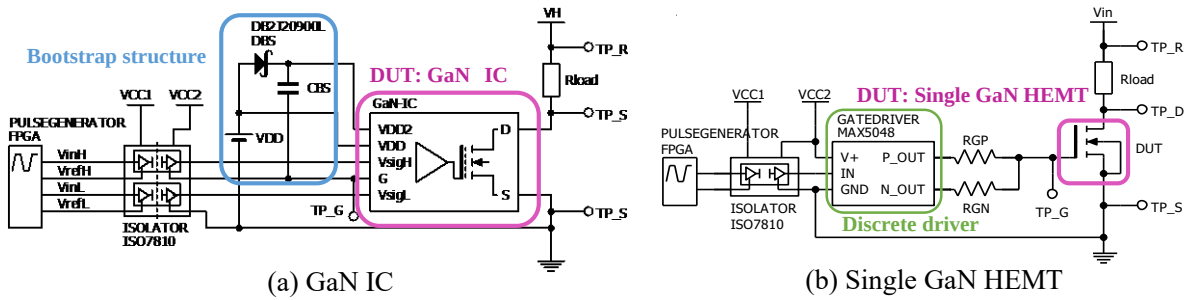


Fig. 9: Measurement setup.

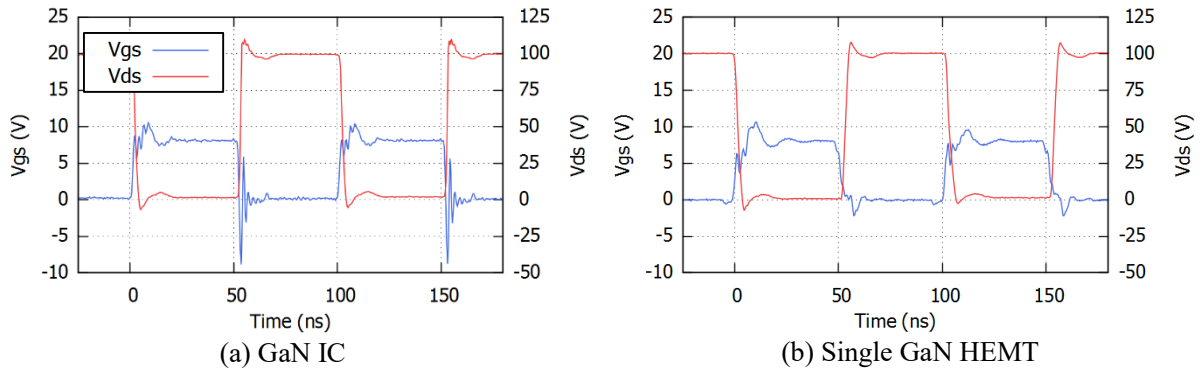


Fig. 10: Measurement results.

4. まとめ

SiC 向けインダクタを用いた電流源型ゲートドライバと、パワーGaN HEMT とゲートドライバを単一集積した GaN IC の設計、実装、評価をそれぞれ行った。実測結果より、提案した電流源型ゲートドライバを用いることで、 t_{off} は 17%、 t_{on} は 35% スイッチング時間が改善した。SiC パワー MOSFET は内部ゲート抵抗が大きいので、大きなピーク値をもつ電流を供給することが可能なゲートドライバにより高速駆動が可能となる。GaN IC のスイッチング特性を評価したところ、 t_{off} は 71%、 t_{on} は 35% スイッチング時間が改善した。と GaN HEMT はプロセス上で HEMT 間を絶縁分離することが出来るため、パワー HEMT と GaN ゲートドライバの単一集積が可能である。これにより、寄生成分を最小限に抑えることで HEMT の高速駆動性能を十分に引き出すことが可能となる。今後はインダクタを外付けした図 1 の構造の GaN IC についてスイッチング特性の評価を行う予定である。

謝 辞

本研究の一部は GAN-TRY 研究助成プログラムによるものである。

参考文献

- [1] 日経エレクトロニクス, “次世代パワー半導体 II 飛躍する SiC と GaN”, 日経 BP 社, (2013).
- [2] 四戸孝, “SiC パワーデバイス”, 東芝レビュー, 第 59 巻, (2014).
- [3] P. Anthony, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 50, No. 1, pp. 573-583, (2014)
- [4] S. Inamori, EPE, pp. DS1a. 2.1-2.7, (2017).
- [5] 二宮大也, 半導体電力変換・モータードライブ合同研究会, SPC-15-007, (2015).
- [6] F. Gamand, IEEE Transactions on Circuits and Systems II, vol. 59, no. 11, pp. 776-779, (2012).
- [7] Y. Yamashita, WiPDA, pp. 231-236, (2018).