

## 外付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HEMTの単一集積化

長尾 詢一郎\* 山下 夕貴 古田 潤 小林 和淑 (京都工芸繊維大学)

Monolithic Integration of current source gate driver and power GaN HEMT using external inductor  
Junichiro Nagao\*, Yuki Yamashita, Jun Furuta, Kazutoshi Kobayashi (Kyoto Institute of Technology)

This paper presents the design of a gate driver, which is monolithically integrated on a single die with power p-gate Gallium Nitride High Electron Mobility Transistors (p-GaN HEMT). It is demanded to achieve downsizing and high efficiency of power conversion circuits in motor drive application like EV. It is mandatory to improve the switching speed of the power devices because the size of passive components in the power conversion circuits can be reduced by increasing switching frequency. In order to improve the switching speed of the power device, it is effective to reduce parasitic components by integrating a gate driver and the power HEMT monolithically. The integrated gate driver works with an external inductor as a current source to charge and discharge the integrated power HEMT rapidly. The fabricated chip can successfully operate at 10 MHz. The measurement results showed that  $V_{DS}$  transition of the GaN IC is faster than the conventional method, and the GaN IC reduced transition time by 46% at turn-on and 20% at turn-off, and reduced energy loss in the power HEMT per switching cycle by 15% under off state  $V_{DS}$  of 100 V and on state  $I_D$  of 5 A.

キーワード：電流源型ゲートドライバ, GaN HEMT, 単一集積化, 高速スイッチング  
(Current source gate driver, GaN HEMT, Monolithic integration, high-speed switching)

### 1. はじめに

従来の Si (シリコン) パワー MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) に代わる次世代デバイスの有力な候補の 1 つとして GaN HEMT がある。GaN HEMT は特にスイッチング特性が優れており、高周波動作向けのデバイスであることから、EV (Electric Vehicle) やドローンなどの小型軽量化が要求される電力変換回路への応用が期待されている<sup>(1)</sup>。電力変換回路の小型化を達成するにはスイッチング周波数を高周波化することが必要となる<sup>(2)</sup>。そのため、スイッチング素子として用いられている従来の Si パワー MOSFET をパワー GaN HEMT に置き換えることで電力変換回路の小型化は実現できる。しかし、ディスクリート型ドライバで GaN HEMT を駆動する従来手法ではゲートドライバと GaN HEMT 間に存在する寄生成分によりスイッチング速度が低減され、GaN HEMT のもつ高速駆動性能を十分に引き出せない。この解決法として、ゲートドライバとパワー GaN HEMT を 1 チップに単一集積することで、配線などの寄生成分を最小限に抑制し、スイッチング速度の高速化を図る手法が提案されている<sup>(3)-(5)</sup>。その他に大きなゲート電流を供給、あるいは放電し、入力容量を高速に

充放電しなければならない<sup>(6)</sup>。この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が提案されている<sup>(7)(8)</sup>。本研究グループも、電流源型ゲートドライバを提案し、SiC (シリコンカーバイド) パワー MOSFET のスイッチング時間を従来型と比較して 20% 以上改善し、高速駆動を実現している<sup>(9)</sup>。

本論文ではパワー GaN HEMT と<sup>(9)</sup>で提案した電流源型ゲートドライバをインダクタを除いて 1 チップ上に単一集積した GaN IC (Integrated Circuit) の構造と測定結果を論ずる。インダクタは GaN IC に外付けし、電流源型ゲートドライバを構成した。この GaN IC は 10 MHz での動作を実現し、従来手法と比較して高速駆動性能を持つことを実測により明らかにした。本稿は次のような構成である。第 2 章で GaN IC について述べ、用いたプロセスや電流源型ゲートドライバの動作原理についても説明する。第 3 章では実測結果について述べる。第 4 章では結論と今後の予定について述べる。

### 2. GaN IC

#### 〈2・1〉 GaN IC のプロセス

GaN HEMT は p 型ゲート GaN-on-QST (Qromis

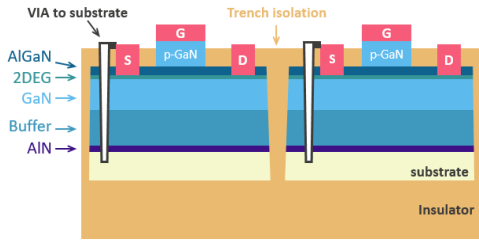


図 1 : GaN HEMT の断面図

Fig. 1: Cross section of the GaN HEMTs.

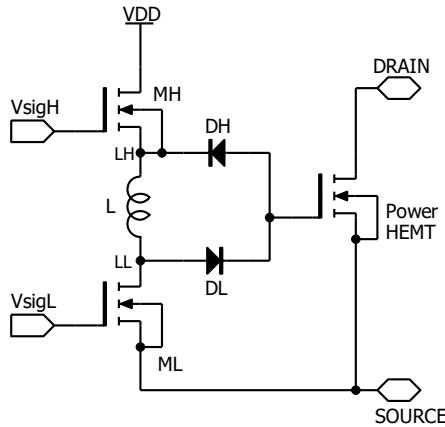


図 2 : 提案する電流源型ゲートドライバ<sup>(9)</sup>

Fig. 2: Proposed Current Source Gate Driver<sup>(9)</sup>.

Substrate Technology, QST<sup>®</sup>)プロセスで試作し、エンハンスメントモード(E-mode、ノーマリーオフ)で動作する<sup>(10)</sup>。GaN HEMT は横型デバイスであり集積化が可能である。HEMT 間の基板をトレンチにより絶縁分離できるため、基板電位の変動によらず、E-mode で安定した動作を可能にする。QST プロセスを用いた HEMT の断面図を図 1 に示す。

(2-2) 提案する電流源型ゲートドライバ

図 2 に提案する電流源型ゲートドライバの回路図を示す。提案型ゲートドライバは 2 つの GaN HEMT (MH, ML)、2 つのダイオード(DH, DL)、インダクタで構成される。インダクタはスイッチング時に電流源として動作する。図 3 にターンオン時の提案型ゲートドライバの動作原理を示す。ターンオン時の動作原理は以下の通りである。

- (1) 初期状態は  $V_{GS}=0\text{ V}$ 。このとき、MH がオフ、ML はオン状態である。
- (2) MH がオンする。電流が青矢印に沿って流れ、インダクタに磁気エネルギーとしてエネルギーが蓄積される。この時のエネルギー蓄積時間( $T_c$ )はゲートの過充電を防ぐため、適切な値に設定する必要がある。
- (3) ML がオフ、DL がオンする。インダクタが電流源として動作し、蓄積されていた磁気エネルギーを電気エネルギーに変換して電流をゲートに放出する。パワー HEMT の入力容量  $C_{iss}$  が充電され  $V_{GS}$  が急激に上昇する。
- (4)  $V_{GS}$  が  $V_{DD}$  を超えると、DH がオンとなり、 $C_{iss}$  の過充電を防止するため電流がゲートから放電され、 $V_{GS}$  が  $V_{DD}$  まで降下する。
- (5)  $V_{GS}$  が  $V_{DD}$  に落ち着き DH、DL がともにオフとなり、パワー HEMT はオンとなる。

ターンオフ動作もターンオン動作と同様である。スイッチング前にエネルギーをインダクタに蓄積し、蓄積したエネルギーを用いて  $C_{iss}$  の放電を行う。提案するゲートドライバは、エネルギーが蓄積されたインダクタを電流源とすることで大きなゲート電流を供給することが出来る。従って提案するゲートドライバは高い駆動力をもつ。提案型ゲートドライバにより、パワー HEMT を高速駆動する要件は、

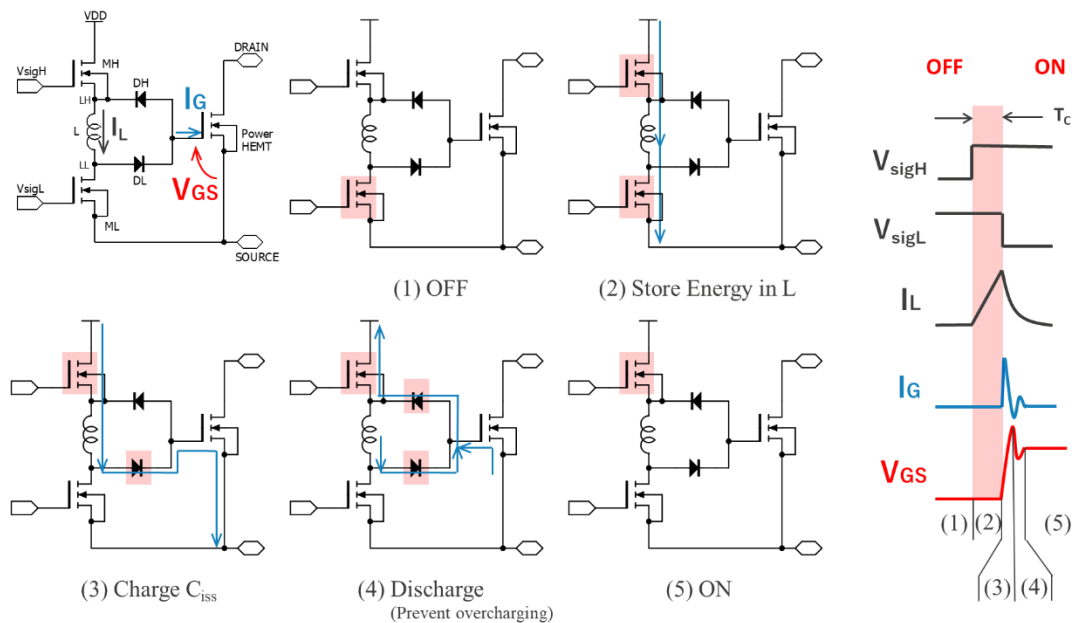


図 3 : ターンオン時の提案型ゲートドライバの動作原理

Fig. 3: Operation principle of the proposed gate driver at turn-on transient.

スイッチング前にインダクタに蓄積されるエネルギーがゲート入力容量を充放電するために必要なエネルギーを超えていることである。ゲート入力容量  $C_{iss}$  がゲート電圧が  $V_{DD}$  に達するまで充電するために必要なエネルギーは式(1)で表される。

$$E_{C_{iss}} = \frac{1}{2} C_{iss} V_{DD}^2 \dots\dots\dots (1)$$

$T_C$  の間にインダクタに蓄積される時間は式(2)で表される。

$$E_L = \frac{1}{2} LI^2$$

$$= \frac{1}{2} L \left( \frac{V_{DD} T_C}{L} \right)^2 \dots\dots\dots (2)$$

式(1)及び(2)より  $E_L > E_{C_{iss}}$  となる条件は式(3)となる。

$$T_C > \sqrt{LC_{iss}} \dots\dots\dots (3)$$

エネルギーをインダクタに蓄積しすぎると、 $V_{GS}$  のリングングが大きくなるほか、ゲートドライバ内の消費電力が大きくなり、 $T_C$  は適当な値に設定することが望ましい。本稿で用いたインダクタは 47 nH、パワーHEMTの入力容量はおよそ 90 pF である。これより、式(3)より  $T_C > 2.1$  ns と求まるので、余裕をもって  $T_C$  は 4 ns とした。

〈2・3〉 製造した GaN IC のレイアウトと HEMT の静特性

試作した GaN IC のレイアウトと集積したパワーHEMTの静特性を図4、5にそれぞれ示す。インダクタを除いた、提案型ゲートドライバの構成素子とパワーHEMTを1チップ上に集積した。ダイオードはGaN ICのショットキー接続を用いて構成した<sup>(1)</sup>。集積したパワーHEMTのオン抵抗  $R_{ON}$  は 67 mΩ であり、耐圧は 200 V である。パワーHEMTをターンオンするのに必要なゲート電圧  $V_{DD}$  は 6

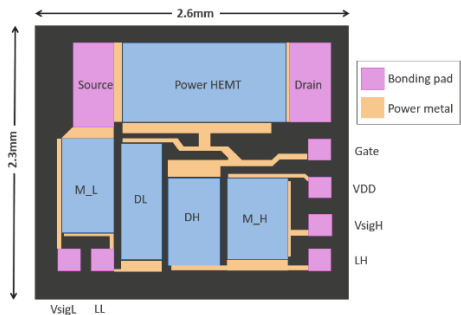


図4：提案する GaN IC のレイアウト  
Fig. 4: Layout of the proposed GaN IC.

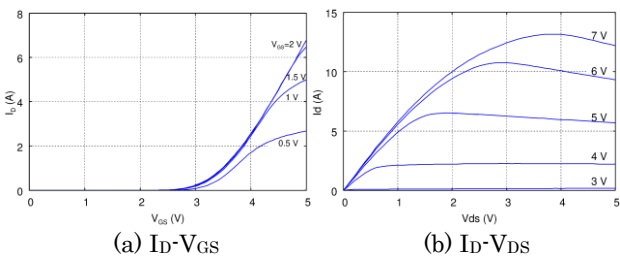


図5：パワーHEMTの静特性  
Fig. 5: DC characteristics of the HEMT.

V から 7 V 程度である。製造した GaN IC のチップサイズは 2.3×2.6 mm である。47 nH のインダクタはチップ上に集積できないため、GaN IC と外付けすることで電流源型ゲートドライバを構成した。GaN IC は DIL-18 (Dual In Line)パッケージに実装した。

3. 実測結果

〈3・1〉 測定方法

集積手法である GaN IC のスイッチング特性測定回路と従来手法であるディスクリート型ゲートドライバによる単体 GaN HEMT のスイッチング特性測定回路を図 6、7 にそれぞれ示す。図 8 に測定環境を示す。提案型ゲートドライバのインダクタは 47 nH のチップインダクタ(Vishay社製、IHLP1616BZ)を用いた。制御信号( $V_{sigH}$ 、 $V_{sigL}$ )はファンクションジェネレータ(KEYSIGHT社製、81160A)により生成した。GaN IC のプレドライバと従来手法のディスクリート型ゲートドライバは絶縁ゲートドライバ IC (Silicon Labs社製、SI8235AB)を用いた。オシロスコープは Tektronix社製の DPO 7054C を用いた。スイッチング特性の測定はゲート・ソース間電圧  $V_{GS}$ 、ドレイン・ソース間電圧  $V_{DS}$ 、ドレイン電流  $I_D$  波形をそれぞれ測定した。電圧波形は図 6、7 のテストポイント(TP\_G、D、S)の電圧を測定することで得た。 $I_D$  は Rload の両端の電圧を測定することで得た。集積化手法の DUT (Device Under Test)である、製造した GaN IC の写真と DIL-18 パッケージを図 9 に示す。従来手法に用いる単体 HEMT は、GaN IC 内のゲートドライバとパワーHEMT間のメタル配線を FIB (Focused Ion Beam)加工することで切断し、GaN IC 内の

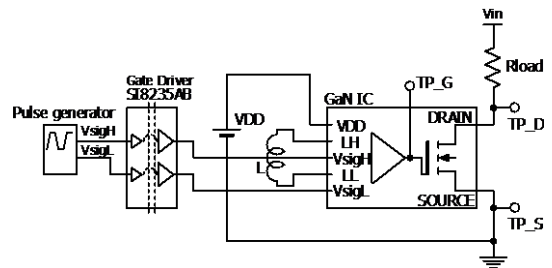


図6：GaN IC スwitching特性測定回路  
Fig. 6: Measurement circuit for the GaN IC.

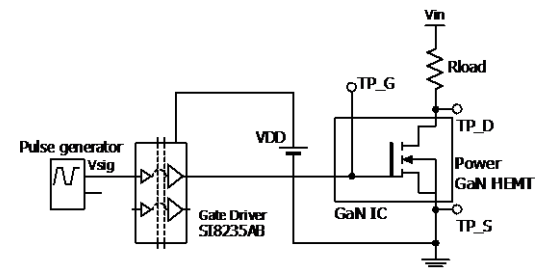


図7：ディスクリート型Switching特性測定回路  
Fig. 7: Measurement circuit for the discrete driver.

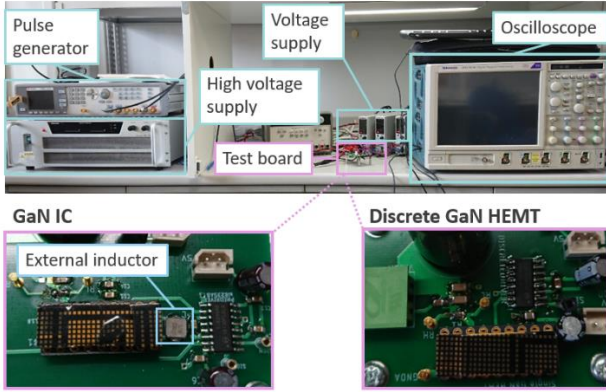


図 8：測定環境写真

Fig. 8: Measurement environment.

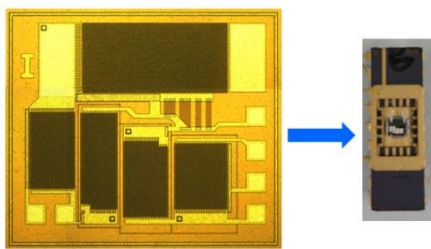


図 9：DIL-18 パッケージに実装した GaN IC の写真

Fig. 9: Photo of GaN IC packaged in DIL-18.

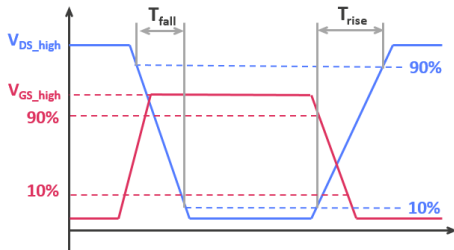


図 10：遷移時間の定義

Fig. 10: Definition of switching transient time.

ゲートドライバの影響を受けずに、同プロセスの HEMT のスイッチング特性を測定できるようにした。本稿では GaN IC とディスクリート型ゲートドライバによる単体 HEMT のスイッチング特性を、 $V_{DS}$  の下降遷移時間  $T_{fall}$ 、上昇遷移時間  $T_{rise}$ 、1 周期あたりのパワー HEMT における損失  $E_{loss(HEMT)}$ 、スルーレート  $dV_{DS}/dt$  についてそれぞれ比較、評価する。遷移時間の定義を図 10 に示す。

### 〈3・2〉測定結果

図 11 に供給電圧  $V_{in}$  を 100 V、 $R_{load}$  を 20 $\Omega$ 、スイッチング周波数を 10 MHz として GaN IC を動作させたときの実測波形を示す。GaN IC は 10 MHz で安定したスイッチング動作を確認した。GaN IC とディスクリート実装のスイッチング波形の比較を図 12 に示す。評価結果を表 1 に示す。評価結果より、GaN IC の遷移時間は、 $T_{fall}$  は 46%、 $T_{rise}$  は 20%、それぞれ従来手法と比較して高速駆動した。GaN IC の高速スイッチングによるスイッチング損失の低

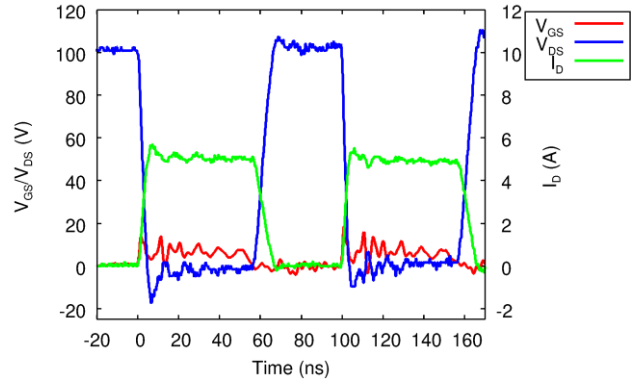
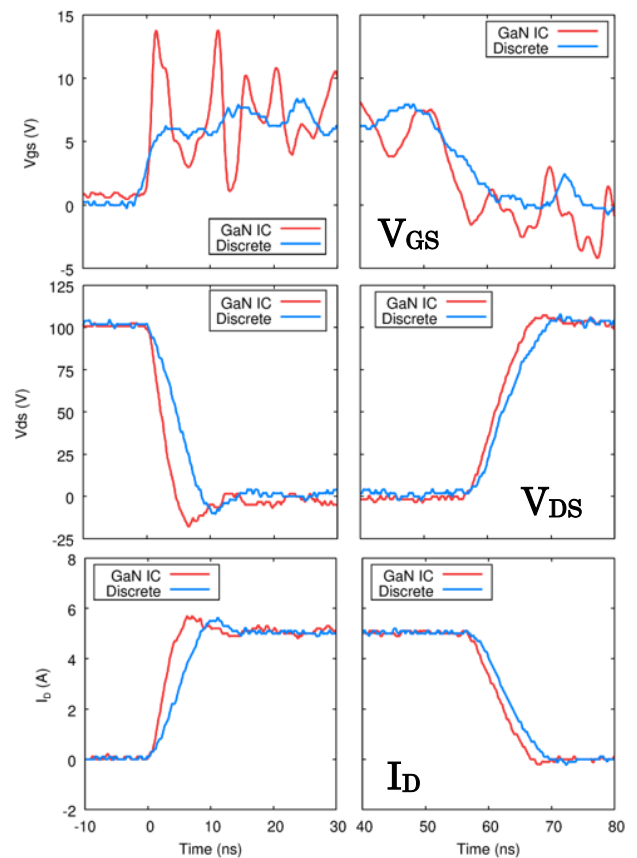


図 11：GaN IC の動作周波数 10 MHz における実測結果

Fig. 11: Measurement waveforms at 10 MHz operation.



(a) ターンオン

(b) ターンオフ

図 12：実測波形

Fig. 12: Measurement waveforms.

減により 1 周期あたりのパワー HEMT の損失は 15% 改善された。 $V_{DS}$  が 50 V の時のスルーレートは、GaN IC がターンオン時 27.6 V/ns、オフ時 9.5 V/ns に対してディスクリート実装がターンオン時 17.0 V/ns、オフ時 7.2 V/ns であった。これらの結果より、提案する GaN IC は高速駆動性能を持つことが実証された。

本稿ではインダクタがチップ上に集積化できないため、配線で外付けすることで提案電流源型ゲートドライバを構成した。そのため、配線による寄生成分の増加により、 $V_{GS}$



表 1: 評価結果

Table 1: Evaluation result.

	Discrete	GaN IC
$T_{fall}$	6.1 ns	3.3 ns (-46%)
$T_{rise}$	8.8 ns	7.0 ns (-20%)
$E_{loss(HEMT)}$	3.3 $\mu$ J/cycle	2.8 $\mu$ J/cycle (-15%)

のリンギングが大きい。今回用いた 47 nH のインダクタよりも小さいインダクタを用いることで、インダクタから供給される電流が小さくなるため、リンギングを抑えられる。また、配線を短くすることで寄生成分を低減し、リンギングを抑えることも可能である。

本研究グループはパワーHEMTの更なる高速スイッチング手法として電流源型ゲートドライバとパワーHEMTの単一集積化を検討している。本稿はその経過報告であり、最終的にはインダクタを3Dプリンタ、あるいはメタル配線で形成し、寄生成分を抑制しながら電流源型ゲートドライバとパワーHEMTを1パッケージに集積し、その高速駆動性能や有用性について検討する予定である。インダクタをパッケージに集積することが実現できれば昇圧回路にその技術を応用する予定である。

#### 4. 結論

本稿では p 型ゲートである E-mode GaN-on-QST プロセスを用いたパワーHEMTと電流源ゲートドライバを1チップ上に単一集積した GaN IC を提案した。インダクタを外付けすることで電流源型ゲートドライバを構成した。試作した GaN IC の 10 MHz におけるスイッチング動作を実測により確認した。個別素子による実装と比べて  $T_{fall}$  は 46%、 $T_{rise}$  は 20%減少した。高速スイッチングによって1周期あたりのパワーHEMTの損失は15%改善された。実測結果より、インダクタを外付けしたため寄生成分は増加したが、電流源として動作するインダクタから供給される大きなゲート電流によって、パワーHEMTは高速にスイッチングされたが、 $V_{GS}$  のリンギングは増大した。

今後は、インダクタを3Dプリンタ、あるいはメタル配線で形成することで寄生成分を抑制しながら電流源型ゲートドライバとパワーHEMTを単一集積化し、更なる高速スイッチングの手法について検討する予定である。

#### 謝辞

本研究の一部は、GaN 研究コンソーシアム、Technical Research Funding Program for Young Researchers によるものである。

#### 文 献

- (1) K. J. Chen, O. Haberlen, A. Lidow, C. I. Tsai, T. Ueda, Y. Uemoto, and Y. Wu, "GaN-on-si technology: Devices and applications", IEEE Transactions. On Electron Devices, Vol. 64, No. 3, p. 779-795 (2017).
- (2) S. Kimura, Y. Itoh, W. Martinez, M. Yamamoto, and J. Imaoka, "Downsizing Effects of Integrated Magnetic Components in High Power Density DC-DC Converters for EV and HEV Applications", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 52, No. 4, pp. 3294-3305 (2016)
- (3) S. Moench, M. Costa, A. Barner, I. Kallfass, R. Reiner, B. Weiss, P. Waltereit, R. Quay, and O. Ambacher, "Monolithic Integrated Quasi-normally-off Gate Driver and 600 V GaN-on-Si HEMT", in 2015 IEEE 3<sup>rd</sup> Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA), pp. 92-97 (2015).
- (4) Y. Yamashita, S. Stoffels, N. Posthuma, S. Decoutere, and K. Kobayashi, "Monolithically integrated e-mode gan-on-soi gate driver with power gan-hemt for mhz-switching", in 2018 IEEE 6th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA), pp. 231-236 (2018).
- (5) Y. Zhang, M. Rodriguez, and D. Maksimovi, "High-frequency Integrated Gate Drivers for Half-bridge GaN Power Stage", in 2014 IEEE 15th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), pp. 1-9 (2014).
- (6) P. Anthony, N. McNeill, and D. Holliday, "High-Speed Resonant Gate Driver With Controlled Peak Gate Voltage for Silicon Carbide MOSFETs", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 50, No. 1, pp. 573-583 (2014).
- (7) H. Fujita, "A resonant gate-drive circuit capable of high-frequency and high-efficiency operation", IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 25, No. 4, pp. 962-969 (2010).
- (8) Y. Long, W. Zhang, D. Costinett, B. B. Blalock, and L.L. Jenkins, "A high-frequency resonant gate driver for enhancement-mode gan power devices", in 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), pp. 1961-1965 (2015).
- (9) S. Inamori, J. Furuta, and K. Kobayashi, "Mhz-switching-speed current source gate driver for sic power mosfets", in 2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe), pp. 1-7 (2017).
- (10) Qromis, <http://qromis.com/>.
- (11) GaN-on-silicon technology, <https://www.imec-int.com/en/200mm-GaN-on-Si-technology>.