

マイクロ波無線電力伝送による超小型絶縁ゲートドライバ

Ultra Compact Isolated Gate Driver with Drive-by-Microwave Technology

根 来 昇 Noboru Negoro	河 井 康 史 Yasufumi Kawai	田 畑 修 Osamu Tabata
崔 成 伯 Songbaek Choe	榎 本 真 悟 Shingo Enomoto	永 井 秀 一 Shuichi Nagai

要 旨

インバータなどの電力変換機器で用いられるIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), SiC (Silicon Carbide) やGaN (Gallium Nitride) といったパワーデバイスを駆動する超小型絶縁ゲートドライバを開発した。今回開発したゲートドライバは、マイクロ波を用いて、制御信号だけでなくパワーデバイスを駆動するのに必要な電力も同時に伝送することができる。さらに、絶縁電源で用いられる大きなトランスを小型化するため、新たな電磁界共鳴結合器を開発した。これにより、従来の絶縁電源が必要なフォトカプラを用いた構成と比較して、実装面積6分の1以下の超小型絶縁ゲートドライバを実現することができた。

Abstract

We have developed an ultra-compact isolated gate driver for switching power devices such as Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs) and next-generation power devices using Silicon Carbide (SiC) and Gallium Nitride (GaN). This compact isolated gate driver can simultaneously provide not only an isolated gate control signal but also gate driving power for switching devices, using microwave wireless power transmission with a compact electromagnetic resonant coupler. The footprint of the fabricated gate driver is less than one-sixth of that of a conventional isolated gate driver, that is, a gate driver composed of a photo coupler and an isolated DC-DC converter.

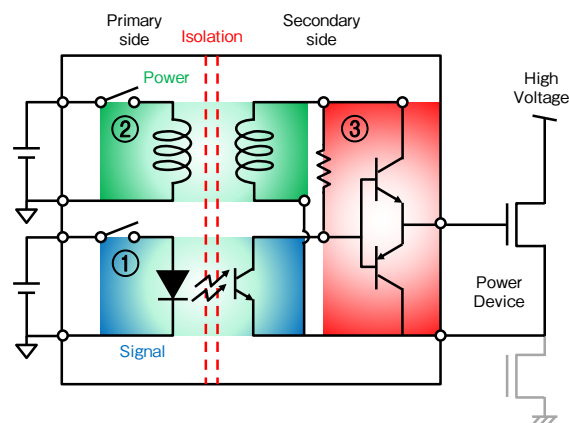
1. はじめに

ゲートドライバは、モータを駆動するインバータなどに使用されるパワーデバイスのオンとオフを制御するデバイスである。特に、パワーデバイスを高電圧で動作させる場合は、低電圧で動作する制御ICなどが配置される1次側と高電圧の2次側を電氣的に絶縁することが必要となる。絶縁が必要となる理由は、以下の2点である。1点目は、過渡電圧による機器の破壊防止やサージ電流による身体への感電を回避するため。2点目は、グランド電位が変動する場合、1次側と2次側で形成されるグラウンドループの短絡電流を防止するためである。これを実現するため絶縁ゲートドライバが用いられる。

このような電氣的な絶縁を確保して、高耐圧パワーデバイスであるIGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) やSiC (Silicon Carbide) デバイス、GaN (Gallium Nitride) デバイスを制御する絶縁ゲートドライバを構成するためには、次の3つの機能が必要となる。

- ① 絶縁して制御信号を伝送する機能
- ② 絶縁して電力を供給する機能
- ③ パワーデバイスのゲート電荷を充放電する機能

上記した3つの機能を合わせて実現する従来の絶縁ゲートドライバの構成を第1図に示す。



第1図 従来の絶縁ゲートドライバの構成

Fig.1 Block diagram of a conventional isolated gate driver

①は、パワーデバイスを制御する信号を2次側に絶縁して伝達するため、フォトカプラあるいはチップ上に作製したトランス (磁気結合) や容量 (容量結合) を用いた素子にて実現される。

②は、①と同様にトランスにより1次側と2次側を絶縁し電力を供給する絶縁型のDC-DCコンバータが必要となる。

③は、①の制御信号と②から電力の供給を受け、パワーデバイスのゲート容量をすばやく充電あるいは放電す

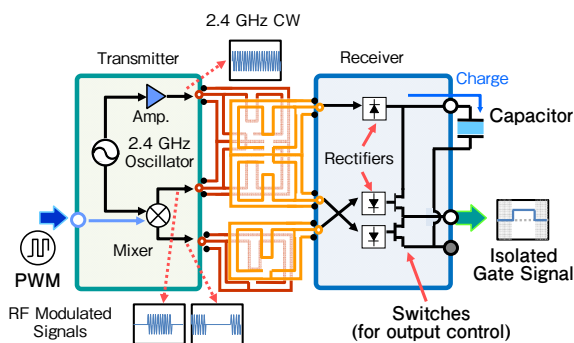
ることができる駆動ICを用いる。

このように3つの部品で構成される従来の絶縁ゲートドライバは、部品点数が多いためサイズが大きくなり、パワーデバイスのゲート近傍に配置することが困難となる。この結果、ゲート配線が長くなることで寄生インダクタンスの影響が大きくなり、設計工数が増加する。このため、絶縁ゲートドライバの小型化が望まれている。

そこで、マイクロ波無線電力伝送技術を絶縁ゲートドライバに適用し、パワーデバイスを制御する信号と電力を同時に供給する新たなドライバ[1][2]を開発したので報告する。

2. マイクロ波絶縁ゲートドライバ (DBM)

第2図に新たに開発したDBM (Drive-by-Microwave) ゲートドライバと呼ぶ絶縁ゲートドライバの構成を示す。機能としては、従来型と同じく電力を供給する部分と信号を伝達する部分、ゲート電荷をすばやく充放電するトランジスタからなる。特徴は2点あり、1点目は、マイクロ波による無線電力伝送技術を用いて、パワーデバイスを制御する絶縁された信号だけでなく、駆動用電力の伝送も同時に行う点である。2点目は、サイズが大型化するトランスを用いた従来方式とは異なり、絶縁素子としての機能を有しつつ高効率な無線電力伝送と小型化を実現した電磁界共鳴結合器 (EMRC: Electromagnetic resonant coupler) である。以下にこれらの技術について説明する。



第2図 DBMゲートドライバの構成

Fig. 2 Block diagram of a DBM isolated gate driver

2.1 無線電力伝送技術を用いた絶縁ゲートドライバ

第2図に示すように、筆者らの開発したDBMゲートドライバの構成は、1次側の送信チップと2次側(高電圧側)の受信チップ、送受信チップの間に配置される電磁界共鳴結合器からなる。1次側と2次側の絶縁は、2つの電磁界共鳴結合器間距離を調整することで確保する。

動作は、送信チップにある発振器により2.4 GHzのマイ

クロ波を発生し、2つに分岐する。1つは、無線電力伝送で電力を2次側へ供給するための信号として、もう1つは、制御信号を変調する信号として用いる。

まず、1つ目の電力供給用のマイクロ波は、アンプで信号を増幅して、結合器を通して2次側へ電力を送る。伝送した電力は、整流回路により高周波 (RF) から直流 (DC) 変換され、ゲート容量を充電する電荷として外部に用意したキャパシタに蓄積する。このキャパシタの容量は、パワーデバイスのゲート容量より十分大きな容量を用いる。

次に、2つ目のマイクロ波は、パワーデバイスのオン／オフを制御するPWM (Pulse Width Modulation) 信号と重畳し、結合器を通して2次側へ伝送する。この信号は、2次側で整流回路により直流の電力をもったPWM信号に復調される。この電力は、復調したPWM信号の電圧振幅として出力される。このように、1次側から2次側へPWMの制御信号だけでなく電力も同時に伝送できることが、この方式の特徴である。

この復調したPWM信号に合わせて、外部のキャパシタと並列に接続した2つの直列接続のトランジスタをオン／オフして、パワーデバイスのゲート容量を充放電してパワーデバイスを制御する。直列に接続されたトランジスタは相補的な動作を行うように設計した。具体的には、上側のトランジスタがオン(下側のトランジスタがオフ)の場合、キャパシタに蓄積された電荷が上側のトランジスタを介してパワーデバイスのゲート容量を充電し、スイッチング用パワーデバイスがオン状態となる。一方、下側のトランジスタがオン(上側のトランジスタがオフ)の場合、ゲート容量の電荷が下側のトランジスタを介して放電し、スイッチング用パワーデバイスがオフ状態となる。

次に、上記したDBMゲートドライバを実現するために鍵となる電磁界共鳴結合器について以下に記述する。

2.2 電磁界共鳴結合器

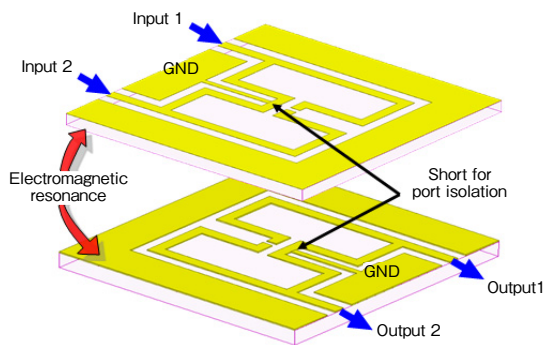
DBMゲートドライバに適用した電磁界共鳴結合器の要求事項は、1次側と2次側の絶縁性の確保と小型化、高効率の電力伝送である。

電磁界共鳴結合器は、LC共振による結合[3]のため、磁界結合を利用するトランスに比べ、結合器の間隔が離れても高効率で電力伝送できる特徴を有する。結合器の耐圧は、2つの結合器間距離と層間の絶縁材料の絶縁破壊電界強度によって決定される。そこで、筆者らは、層間材料の厚さを0.28 mmとして、5 kV以上の耐圧を確保した。

次に、小型化について記載する。従来のオープンリン

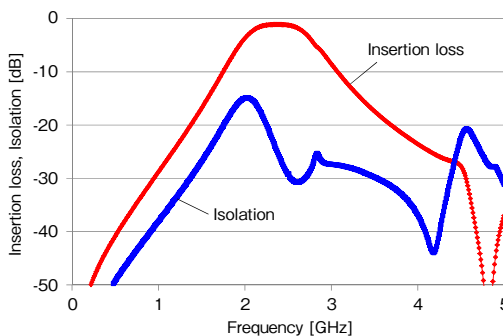
グ型電磁界共鳴結合器[4]は、共鳴現象を利用するため、搬送波の1/2波長の線路長が必要となる。このため、DBMゲートドライバで使用する2.4 GHzのマイクロ波では、真空中での1/2波長が約6 cmあり、結合器サイズが非常に大きくなる。

そこで、筆者らが新たに開発した2x2バタフライ型電磁界共鳴結合器の構造を第3図に示す。この結合器は、入出力端子のグランドと結合器の配線端の一方をショートすることで、2つの入力端子間および2つの出力端子間で信号を分離することができる。加えて、グランドとショートした位置で信号を全反射させ、1/4波長の線路長での共振を実現した。さらに、結合器の中央部の配線をお互いに近接することで、結合を強化させ、さらなる小型化を実現した。この結果、作製した3入力3出力の結合器は、5.8 mm × 8.8 mm × 1.0 mmとなり、1つのパッケージに集積化できるようになった。



第3図 2x2バタフライ型電磁界共鳴結合器
Fig. 3 2 x 2 butterfly-shaped EMRC

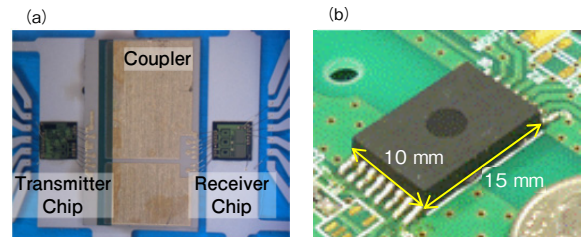
第4図に示すように、作製した結合器は、挿入 (Input 1 - Output 1への伝送) 損失が1.1 dB @ 2.4 GHz, Input 1とOutput 2のアイソレーションが25 dBであり、良好な特性を示す結合器を実現することができた。



第4図 作製した2x2バタフライ型電磁界共鳴結合器の伝送特性
Fig. 4 Insertion loss and isolation characteristics of the fabricated 2 x 2 butterfly-shaped EMRC

2.3 DBMゲートドライバの特性

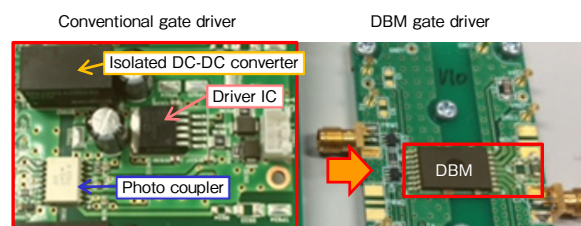
第5図に作製したDBMゲートドライバのパッケージ内部の構造 (a) と外観写真 (b) を示す。送信チップと受信チップともにサイズは、2 mm × 2 mmである。パッケージサイズは、3チップ (送受信チップ+結合器) を1パッケージ化することで、10 mm × 15 mm × 2.4mmを実現した。



第5図 DBMゲートドライバのパッケージ
(a) 内部構造, (b) 外観

Fig. 5 DBM gate driver package
(a) Internal structure; (b) Overall appearance

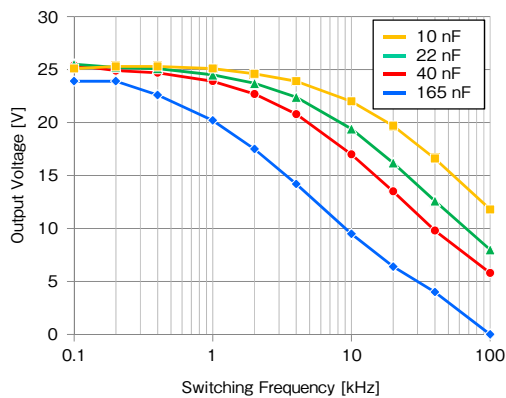
次に従来の絶縁ゲートドライバの構成とDBMゲートドライバの比較を第6図に示す。従来の絶縁ゲートドライバは、絶縁電源 (絶縁DC-DCコンバータ) とフォトカプラ、駆動ICで構成され、サイズは約4 cm × 6 cmであった。一方、DBMゲートドライバは、電力をためる外部キャパシタと出力電圧に制限を加える場合はツェナーダイオードを追加するだけで実現することができるため、約1.2 cm × 3 cmで実現することができる。このようにDBMゲートドライバは、従来の絶縁ゲートドライバと比較して、6分の1以下のサイズで実現することができる。



第6図 従来の絶縁ゲートドライバとDBMの比較
Fig. 6 Comparison between conventional isolated gate driver and DBM gate driver

第7図に、駆動するパワーデバイスのゲート容量に見立てた各容量負荷での出力電圧と駆動周波数の関係を示す。出力電圧は、容量負荷が大きくなると電力の供給が不足するため、低い周波数から出力電圧が低下し始める。デバイスによりゲート容量は異なるが100 A程度のSiCデバイス (図中10 nFに相当) であれば出力電圧20 Vを保持

して駆動周波数10 kHzで動作させることができる。



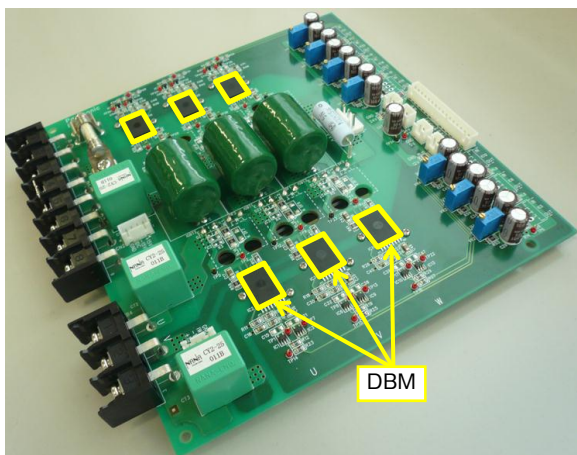
第7図 各容量負荷での出力電圧と駆動周波数の関係

Fig. 7 Relation between output voltage and switching frequency in various capacitive loads

3. IGBTインバータモジュールの駆動評価

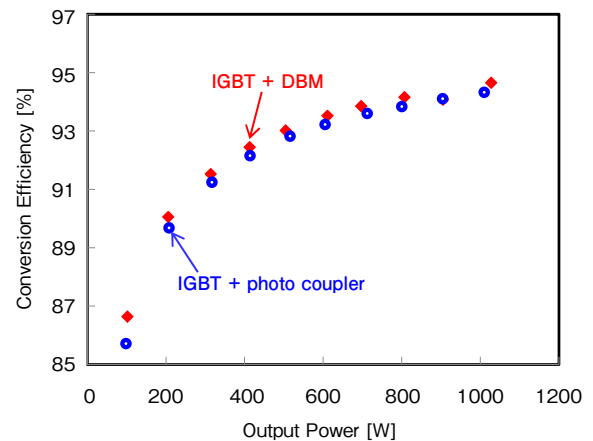
第8図にIGBTとDBMゲートドライバを用いて作製したモータ駆動用インバータモジュールを示す。今回使用したIGBT (Cies=2.08 nF) は、定格600 V-30 Aのものを用い、基板の裏面にレイアウトした。インバータモジュールは、電源電圧200 Vを10 kHzのPWM信号を用いてIGBTのスイッチングを行い、モータ駆動時の電力変換効率評価を行った。その結果を第9図に示す。

比較のために、従来の構成で用いられるフォトカプラを用いたインバータモジュールも作製し、同様の評価を行った。DBMを用いたインバータモジュールは、従来のフォトカプラのものと同等の電力変換効率を達成し、フォトカプラの構成と遜色のない特性を示すことを実証した。また、DBMゲートドライバは、これまでにGaNデバ



第8図 DBMを用いたインバータモジュール

Fig. 8 Inverter module with the DBM gate driver



第9図 従来のインバータと比較した電力変換効率

Fig. 9 Power conversion efficiency of the inverter compared with a conventional inverter

イス[2],[5]のスイッチング動作も確認しており、今後は、絶縁が必要な具体的なアプリケーションへの適用を目指し、開発を進めていく。

4. まとめ

マイクロ波を用いた無線電力伝送技術と電磁界共鳴結合器を適用した新しい絶縁ゲートドライバを開発した。DBMゲートドライバは、フォトカプラやトランスを用いた従来の絶縁ゲートドライバの構成と比較して、実装面積を6分の1以下に小型化することができ、絶縁破壊耐圧は5 kVを確保した。DBMゲートドライバを用いたインバータモジュールは、フォトカプラを用いた従来のものと同等の特性を示すことを実証した。

今後は、絶縁が必要となる高電圧用パワーデバイスの絶縁ゲートドライバとして、出力電力の向上とスイッチング周波数の高周波化といった駆動能力の向上を図るとともに、信頼性の確認を行い、早期の実用化を目指す。

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業の結果得られたものである。

参考文献

- [1] S. Nagai et al., "A DC-Isolated Gate Drive IC with Drive-by-Microwave Technology for Power Switching Devices," 2012 IEEE ISSCC Vol.65, pp.404-405, 2012.
- [2] S. Choe et al., "A 1W power consumption GaN-based isolated gate driver for a 1.0 MHz GaN power system," Proceedings of the 29th ISPSD, pp.33-36, 2017.

- [3] A. Kurs et al., "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," Science, vol.317, pp. 83-86, 2007.
- [4] I. Awai et al., "Open ring resonators applicable to wide-band BPF," Microwave Conference Asia-Pacific, pp.167-172, 2006.
- [5] Y. Kawai et al., "An isolated DC power supply free compact GaN inverter module." 2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, pp.84-88, 2015.

執筆者紹介



根来 昇 Noboru Negoro
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 技術本部
Engineering Div.,
Automotive & Industrial Systems Company
博士 (工学)



河井 康史 Yasufumi Kawai
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 技術本部
Engineering Div.,
Automotive & Industrial Systems Company



田畑 修 Osamu Tabata
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 技術本部
Engineering Div.,
Automotive & Industrial Systems Company



崔 成伯 Songbaek Choe
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 技術本部
Engineering Div.,
Automotive & Industrial Systems Company
博士 (工学)



榎本 真悟 Shingo Enomoto
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 技術本部
Engineering Div.,
Automotive & Industrial Systems Company



永井 秀一 Shuichi Nagai
オートモーティブ&インダストリアルシステムズ社 技術本部
Engineering Div.,
Automotive & Industrial Systems Company
博士 (工学)