

新等価回路を用いた3,300V フルSiC パワーモジュールの動特性解析

Dynamic Characteristics Analysis of 3,300-V Full SiC Power Module
by New Equivalent Circuit

初川 聡*
Satoshi Hatsukawa

豊島 茂憲
Shigenori Toyoshima

築野 孝
Takashi Tsuno

御神村 泰樹
Yasuki Mikamura

ワイドギャップ半導体であるシリコンカーバイド (SiC) はシリコン (Si) に比べて絶縁破壊電界、電子飽和速度、熱伝導率が大い、という優れた特性を持つことから、次世代のパワーデバイス材料として期待されている。従来のSiを材料とした場合、スイッチング損失の小さい金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ (MOSFET) では、鉄道車両や電力設備などのインフラ用途で需要の高い3,300 V耐圧を実現するのが困難なため、絶縁ゲートバイポーラトランジスタ (IGBT) やPN接合型ダイオード (PND) が広く用いられている。我々は、SiCを用いた3,300 V耐圧のMOSFET、ショットキーバリアダイオード (SBD) 及びこれらを搭載したモジュールを作製した。SiCパワーモジュールでは、高速スイッチングのため、モジュール内部インダクタンスで発生する過大電圧が懸念される。内部インダクタンスを等価回路で表すことはその解析に有効である。筆者らはモジュール全体を表現する新たな等価回路を開発したのでここに報告する。

Silicon Carbide (SiC) devices are promising candidates for high-power, high-speed, and high-temperature switches owing to their superior properties. We have been developing SiC-based 3,300-V class metal-oxide-semiconductor field-effect transistors (MOSFETs) and schottky-barrier diodes (SBDs). Stray inductance in the module and the great current changing rate with high-speed switching may cause excessive voltage overshooting. Although equivalent circuits are effective for stray inductance analysis, previous equivalent circuit studies covered only a partial area of the entire module. This paper proposes a new method for the dynamic characteristics analysis using the precise equivalent circuit of the entire module.

キーワード：SiC MOSFET、SiC SBD、SiCパワーモジュール、低インダクタンス、等価回路

1. 緒言

地球温暖化に対する国際的な意識が大きな高まりを見せ、CO₂排出量削減の必要性が広く認識されてきており、また石油等の化石燃料資源の枯渇が近づきつつあることから、省エネルギー技術の開発が重要視されている。電気エネルギーは、非常に使い勝手のよいエネルギーであることから全エネルギーに占める割合は年々増加しており、それを効率的に運用する技術の開発は、省エネルギーに向けての重要な柱と位置づけられている。電力エネルギーはさまざまな変換を受けて用いられる。その変換におけるキーとなるデバイスが、電力機器向けの半導体素子すなわちパワーデバイスであり、省エネルギーのためにより優れたパワーデバイスの登場が望まれるようになってきた。

パワーデバイスは、高耐圧化、大電流化、高速・高周波化されているが、そのほとんど全てが通常の半導体と同様にシリコンの上に作製されている。Siパワーデバイス分野では、パワー用金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ、絶縁ゲート型バイポーラトランジスタなどの素子が開発され、適用範囲が広がってきた。しかし、その特性はすでに絶縁破壊電界や電子飽和速度等の物性値から導出される理

論的限界に近づきつつあり、Siに変わる新しい半導体材料を用いた高性能デバイスの開発が望まれる。

新しい半導体材料の有力候補がワイドバンドギャップ半導体である炭化珪素である。SiCは研磨剤や放熱材料として用いられてきたが、高品質な単結晶の開発に伴い半導体としての研究が活発化してきた。SiCは、Siに比べて、絶縁破壊電界、電子飽和速度、熱伝導率が大きくパワーデバイスに適用する上で優れた特性を有することから、より高耐圧、高速動作、低オン抵抗のデバイスを目指して、SiCを用いたパワーデバイスの研究開発が精力的に行われている^{(1)~(3)}。

SiCショットキーダイオードが、市販されたのに続き、スイッチングデバイスについても精力的に開発が続けられており、特に縦型MOSFETの開発が盛んである。これは、SiのMOSFETの構造、プロセスをそのまま適用できることに加え、大電流、高耐圧のデバイスとして期待が大きいからである。

筆者らは、3,300 V 400 AのSiCパワーモジュールを開発し、その優れた高速スイッチング特性を確認した⁽⁴⁾。高速スイッチングに伴い電流変化率が增大することで、内部イ

インダクタンスにより過大電圧が発生する懸念がある。その対策として、1,200 V 100 AのSiC低インダクタンスパワーモジュールの開発も行った⁵⁾。3,300 V 400 A SiCパワーモジュールについても同様の低インダクタンスモジュールの開発のため、内部インダクタンスの解析を行っている。それにはパワーモジュールを等価回路で表現することが有効であるが、これまではモジュールの素子とインダクタンスを代表値で表す手法が知られていた。筆者らはモジュールの個々の構成要素を表現する新たな等価回路作成手法を開発し、実測値によく合う結果を得たので、ここに報告する。

2. SiCパワーモジュールの新モデル

図1に開発した、3,300 V 400 A SiCパワーモジュールを示す。モジュールは、インバータで使用される際、高圧側アーム (D1-S1) と低圧側アーム (D2-S2) の2アームで構成される2 in 1モジュールである。1アームの順方向オン特性を図2に示す。ゲート電圧 (V_{GS}) が20 V、ドレイン電圧 (V_{DS}) が2 Vの時に、400 Aの定格電流が流れることが判る。図3に内部構造を示す。6個のSiC MOSFETチップと、6個のSiC SBDチップが、1枚の基板に搭載され、

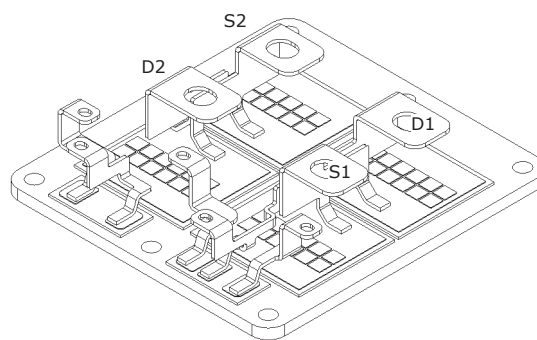


図3 3,300 V 400 A SiC パワーモジュール内部構造

2枚で1アーム、2アームで2 in 1モジュールを構成する。1アームあたりSiC MOSFET と SiC SBDがそれぞれ12個並列されている。

図4に従来のモジュール等価回路を示す。SiC MOSFET とSiC SBDおよび内部インダクタンスが各々統合された一つの代表モデルで表わされている。

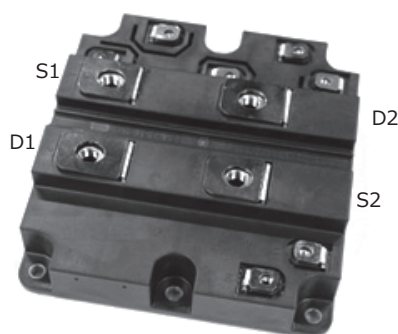


図1 3,300 V 400 A 2 in 1 SiCパワーモジュール (130×140 mm²)

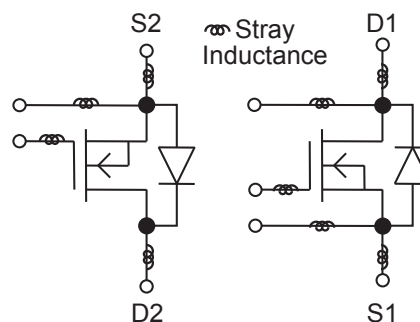


図4 モジュール従来内部等価回路

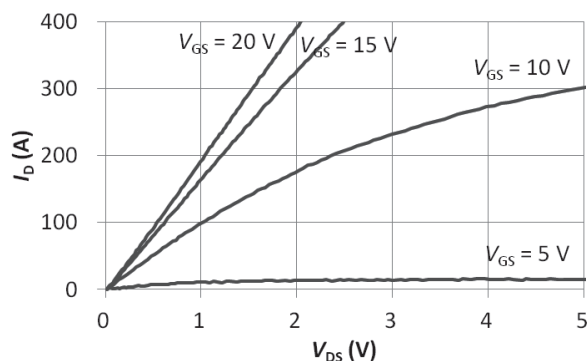
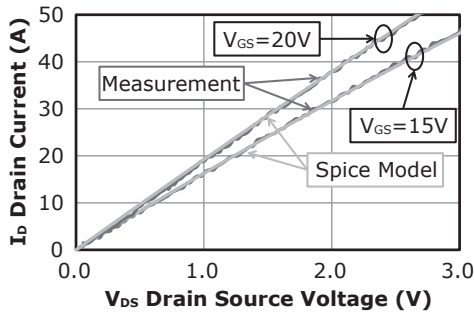


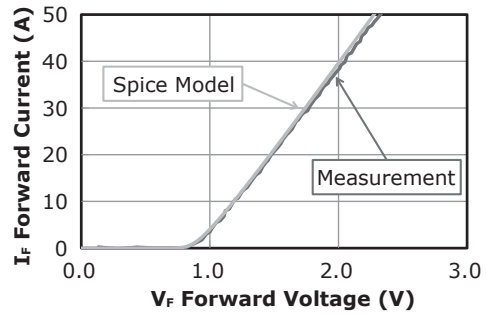
図2 3,300 V 400 A SiCパワーモジュール I_D - V_{DS} 順方向特性

新たな等価回路作成に際し、まずSiC MOSFETとSiC SBDの単体チップのSPICE^{*1}モデルを求めた。MOSFETはNMOSモデル、SBDはDモデルを用い、測定値と計算値がフィットするように手動でパラメータを調整して作成した。図5にSiC MOSFETとSiC SBDの1チップの順方向特性について、作成したモデルの計算値と実測値を合わせて示す。計算値は実測値をよく模擬できている。次に端子、基板上パターン、ワイヤボンドなどの導体による内部インダクタンスは、ANSYS Q3D Extractorを用いて、等価回路として表した。

以上のSiC MOSFETおよびSiC SBDモデルと、インダクタンス等価回路を組み合わせ、モジュール内部の等価回路を作成した。その一部を図6に示す。図6は1枚の基板



(a) 3,300 V SiC MOSFET (1 chip)



(b) 3,300 V SiC SBD (1 chip)

図5 順方向特性のモデルと実測値の比較

上のSiC MOSFET 6チップとSiC SBD 6チップとそのインダクタンス回路を表わしている。図では省略しているが、各インダクタンス間には相互インダクタンスが存在する。作成した等価回路をLTspice IVで計算を行うと、エラーが出るか、非常に長い時間を要する結果となった。エラーの原因はインダクタンス等価回路が複雑で計算が煩雑になったためであった。そこで、影響の小さいインダクタンスを自動で省くようなインダクタンス等価回路作成プログラムを開発した。

その等価回路と組み合わせることで、エラーが発生せず、また短時間で計算ができるようになった。

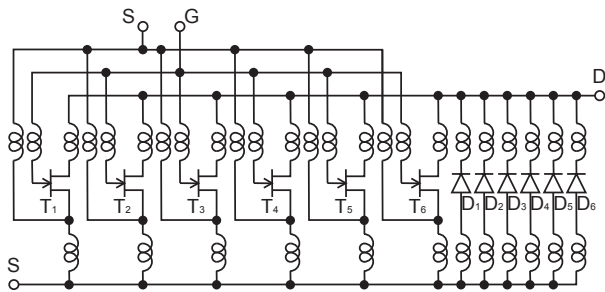


図6 モジュール等価回路 (1基板分)

これまでの、モジュールの動特性をシミュレーションするには、電磁界解析が必要であったため、本方式の開発により短時間でのシミュレーションが可能になった。

3. SiCパワーモジュールモデルの評価

図7にSiCパワーモジュールの動特性評価回路を示す。動特性は100 μ Hのリアクタンス負荷を用い、室温で行った。図8に電圧1,650 Vのときの動特性波形を示す。

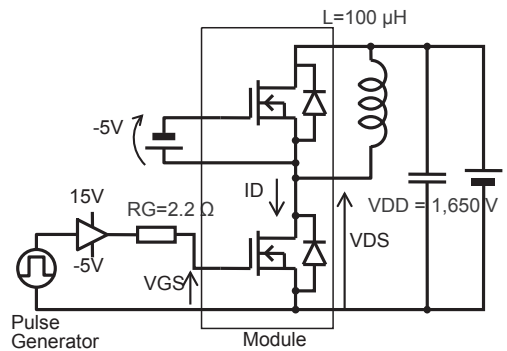
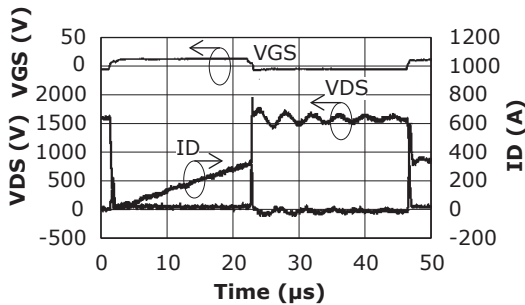
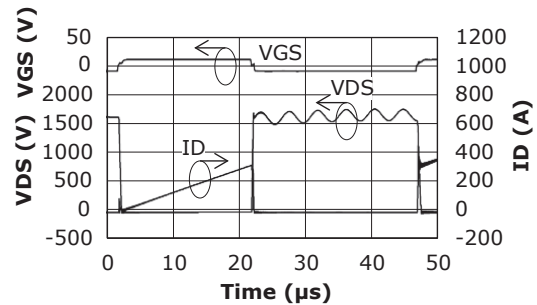


図7 動特性評価回路



(a) 実測波形



(b) モデルを用いた計算波形

図8 動特性波形の比較 (インダクタンス負荷スイッチング、電源電圧1,650 V)

図8 (a) は実測波形で、図8 (b) はSiCパワーモジュールモデルを用いてLTspice IVで計算した結果である。実測値では立ち上がり時間 t_r と立ち下がり時間 t_f はそれぞれ $t_r = 404$ nsおよび $t_f = 238$ nsであるのに対し、計算値では $t_r = 402$ ns および $t_f = 226$ nsとよく一致する結果となった。また、 V_{DS} の共振周波数についても実測値で22.5 kHzに対し、計算値で23.2 kHzとこれについてもよく合う結果となった。

次にモジュールを構成するSiCチップ毎の電圧電流の計算を行った。このモジュールの動作側のアームは、図9に示すように補助端子から見て、近接側と遠方側の二枚で構成される。図10 (a) にターンオン時、図10 (b) にターンオフ時の動特性計算結果を示す。チップ毎の各電圧 V_{DS} は等しいが、電流 I_D については、近接側が遠方側より大きい結果となった。特に近接側にはターンオン時にオーバーシュートが発生しており最も電流が流れたN4チップでは90 Aに達している。

近接側の電流が大きいのは、図10中でゲート電圧 V_{GS} が近接側では大きく遠方側では小さくなっており、これが、MOSFETのオン抵抗の差を生じさせ、電流の差に現

れたと考えられる。また、近接側のオーバーシュートは、遠方側のゲート回路のインダクタンスで信号が遅延し、近接側のみに電流が集中したためと考えられる。

これらの結果から、各チップにゲート信号が同時に到達するように、基板配線を改良する予定である。

4. 結 言

3.300 V 400 A SiCパワーモジュールの等価回路を作成し、実測定波形をよく模擬できることを確認した。

今後は、このモデルを用いて、モジュール内での電流分配を最適化し、オーバーシュートなどの異常波形を生じない低インダクタンスモジュールの設計に生かす所存である。

用語集

※1 SPICE

Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis: 1973年にカリフォルニア大学バークレー校で開発された電子回路のアナログ動作をシミュレーションするソフトウェア。

- ・ Q3D ExtractorはANSYS社の商標です。
- ・ LTspice はLiner Technology社の商標です。

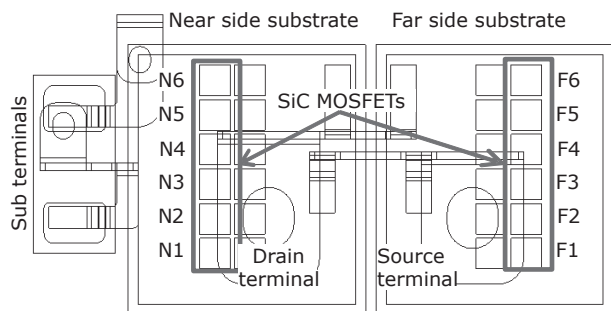


図9 1アームのチップ配置図

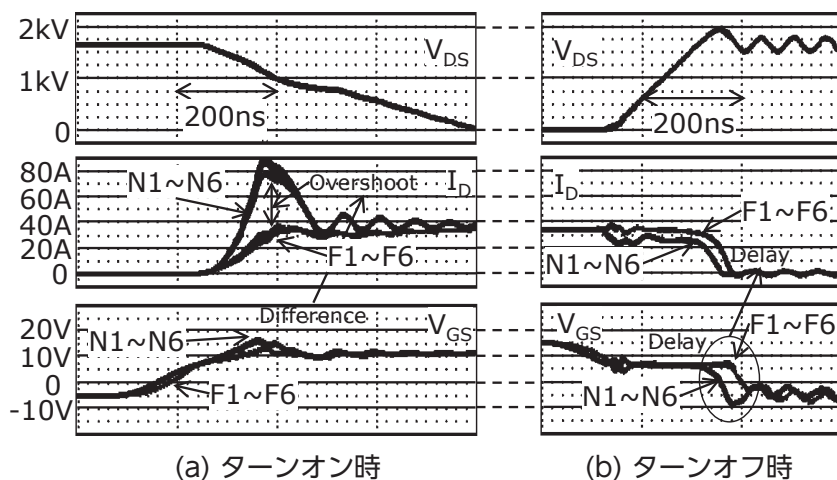


図10 各チップ電流のスイッチング波形計算値 (電源電圧1,650 V)

参 考 文 献

- (1) M. Bhatnagar, B. J. Baliga, IEEE Trans. Electron Devices, 40 (1993) 645-655
(2) Z. Stum, A. V. Bolotnikov, et al., Mater. Sci. Forum., 679-680 (2011) 637-640
(3) A. Bolotnikov, P. Losee, et al., in Proc. ISPSD (2012) 389-392.
(4) 酒井、豊島、和田、古米、築野、御神村、SEIテクニカルレビュー第187号、pp.48-53 (2015)
(5) 豊島、初川、平方、築野、御神村、SEIテクニカルレビュー第186号、pp.75-78 (2015)

執 筆 者

初川 聡* : パワーデバイス開発部 主幹



豊島 茂憲 : 伝送デバイス研究所



築野 孝 : パワーデバイス開発部 グループ長
(理学博士)



御神村泰樹 : パワーデバイス開発部 技術部長



*主執筆者