

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H06890

研究課題名(和文)炭化珪素バイポーラトランジスタのデバイス特性モデル化と高周波電力変換回路の製作

研究課題名(英文) Device modeling of SiC bipolar junction transistors and fabrication of high-frequency power converters

研究代表者

奥田 貴史 (Okuda, Takafumi)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：00783036

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では炭化珪素(SiC)バイポーラトランジスタ(BJT)を用いた高周波電力変換回路の実現をめざした。まず、動作周波数1 MHzの高周波スイッチングに対応できる回路シミュレーション環境を構築した。構築したシミュレーション環境を活用し、高周波ベース駆動回路を製作した。BJTは電流駆動回路であるため、駆動回路に工夫を要する。この駆動回路を利用した100 W級の昇圧回路を製作した。製作した昇圧回路は1 MHzの高い動作周波数でも94%の変換効率を実現した。SiC BJTの高周波パワースイッチングデバイスとしての可能性を示すことができたと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, high-frequency power converters are investigated with silicon carbide (SiC) bipolar junction transistors (BJTs). In order to design high-frequency power converters, numerical simulation is constructed by developing device models of semiconductor devices and analyzing parasitic components of circuits. Then, a high-speed gate driving circuit is designed using the constructed numerical simulation. Since BJT is a current-controlled device, a speed-up capacitor with a base resistance is required for high-frequency switching. Finally, a 100-W DC-DC boost converter is fabricated using a SiC BJT. It is found that the power conversion efficiency is 94% at a switching frequency of 1 MHz.

研究分野：電子デバイス

キーワード：炭化珪素 バイポーラトランジスタ 電力変換回路 ベース駆動回路 高周波動作 デバイスマデリング  
スイッチング特性

### 1. 研究開始当初の背景

電気エネルギーの利用効率向上には、パワーエレクトロニクスによる電力変換技術の活用が極めて有効である。電力変換効率のさらなる向上にむけて、根幹となるパワー半導体デバイスの低損失化が必要である。しかし、現在の Si 半導体デバイスは物性値に起因する理論限界に達しつつあり、これ以上の大幅な低損失化は見込めない。そこで、Si よりも優れた材料物性を有するワイドギャップ半導体 4H-SiC (4H 型結晶構造の炭化ケイ素) を用いたパワーデバイスが注目されている。理論的には導通損失を Si デバイスの約 1/300 に低減することができる。

SiC を用いた電力変換用パワー transistor として、電界効果 transistor (MOSFET) の研究開発が国内外の大学・企業により進められてきた。しかし、SiC MOSFET はデバイス動作領域に SiO<sub>2</sub>/SiC の界面を用いる構造であり、その界面の品質が問題となっている。

そこで、申請者は別のデバイス構造である SiC npn 型バイポーラ transistor (SiC BJT) に注目している。SiC BJT は pn 接合を用いるデバイスであり、SiO<sub>2</sub>/SiC 界面を動作領域として用いない。そのため、MOSFET で問題となっている低いチャネル移動度といった課題がなく、低導通損失で高温動作 (>300 °C) が可能である。また、MOSFET ではゲート酸化膜容量の充放電がスイッチング特性を大きく制限するが、SiC BJT では酸化膜の充放電が不要であり、極めて速いスイッチング (>10 MHz) が期待される。

以上から、SiC BJT は次世代の電力変換用デバイスとして重要な位置づけにあり、電力変換回路に実装すべく応用研究を加速させることが重要である。

### 2. 研究の目的

SiC BJT は 2000 年ごろより研究が開始され、当初は電流増幅率  $\beta$  が低いという課題があったが、現在では  $\beta \sim 100$  をこえる高い増幅率が得られるようになってきた。また、Si を用いた BJT では、破壊耐量が小さくスイッチング時に破壊しやすいという問題(2 次降伏)があったが、SiC ではその優れた材料物性から十分な破壊耐量を実現できることが分かっている。

高性能 SiC BJT の報告がなされるようになったが、これまでの議論の中心は静特性(エミッタ接地電流-電圧特性など)であった。しかし、実際の電力変換用途ではスイッチング時の過渡特性(動特性)が重要である。高周波スイッチング特性に注目し、SiC BJT の性能を十分に引き出した電力変換回路の設計が重要である。

そこで本研究では、まず、高周波スイッチングに対応した回路シミュレーション環境を構築し、1 MHz 級電力変換回路の設計基盤を整える。そして、これをもとに昇圧回路を設計し、SiC BJT を用いた高周波電力変換回

路の実現をめざす。

### 3. 研究の方法

本研究は、(a) 回路シミュレーション環境の構築、および(b) SiC BJT の高周波スイッチング特性をいかした電力変換回路の製作、の 2 つからなる。

1 MHz をこえる高周波動作回路では transistor およびダイオードの半導体デバイスモデルの見直しが必要である。これについて、半導体物理に立ちかえり、高周波領域でも適用可能なモデルを構築する。また、スイッチング周波数が向上するにつれて、回路基板に寄生するインダクタンスの影響が顕在化してくる。そのため、これらの影響を考慮し、高周波スイッチングを設計するためのシミュレーション環境構築が重要である。

次に、電力変換回路の製作では、transistor を駆動するためのゲートドライバ(ベースドライバ)の高速化が重要である。特に SiC BJT は電流駆動素子であるため、スイッチングの際の瞬間的なベース充放電にくわえて、定常的にベース電流を供給できるように駆動回路を設計する必要がある。この駆動回路を用いて、直流昇圧回路である Boost Converter を製作する。1 MHz の高周波領域で動作させ、変換効率を評価する。

### 4. 研究成果

#### (a) 回路シミュレーション環境の構築

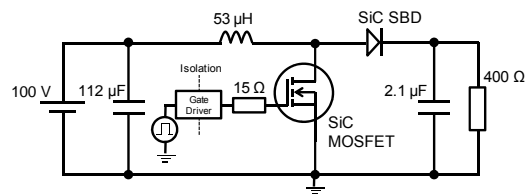


図 1 製作した昇圧回路

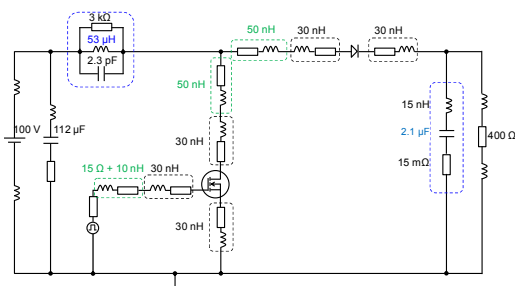


図 2 回路シミュレーションに考慮した寄生成分

本節で製作した Boost Converter を図 1 に示す。半導体デバイスには SiC MOSFET (ROHM 社, SCT2450KE, 定格 1200 V, 10 A) と SiC SBD (ROHM 社, SCS220AE2, 定格 650 V, 10 A) を用いた。入力は 100 V とし、200 V, 50 W を出力する。チョークインダクタには 53 µH、出力キャパシタには 2.1 µF のものを用いた。動作周波数 1 MHz では連続導通モードとなる。ゲートドライバには Si Labs. Si8235 を用いた。

回路シミュレータには SIMetrix を用いた。半導体デバイスモデルについて Verilog-A を用いて記述し、シミュレータに組み込んだ。SiC SBD については、熱電子放出に基づくモデルを用い、SiC MOSFET については表面電位に基づくモデルを構築した。また、SiC BJT には Gummel Poon モデルをもとに構築した。それぞれ、電流-電圧 ( $I$ - $V$ ) 特性および容量-電圧 ( $C$ - $V$ ) 特性から動特性を記述するものである。

回路シミュレーションでは図 2 に示すように寄生成分を取り込んだ。インピーダンスアナライザ (Keysight 4294A) をもちいて、チョークコイル、コンデンサなどのインピーダンス特性を測定し、集中定数回路で模擬した。また、配線やトランジスタソケットに寄生するインダクタンス成分も同様に模擬した。

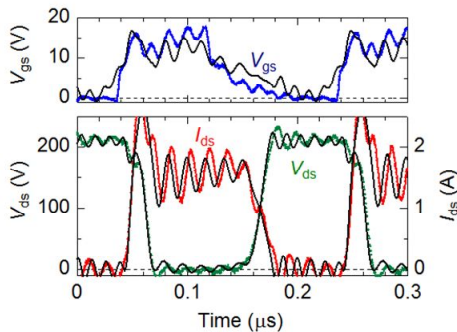


図 3 製作した昇圧回路におけるトランジスタのスイッチング波形 (色線) と回路シミュレーションによる結果 (黒線)

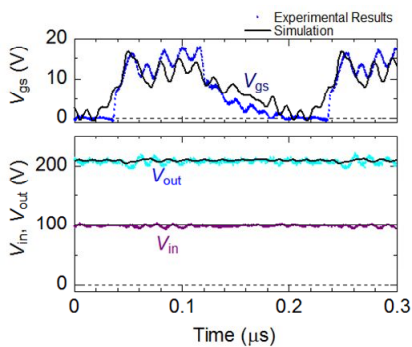


図 4 製作した昇圧回路における出力特性 (色線) と回路シミュレーションによる結果 (黒線)

製作した昇圧回路における SiC MOSFET のスイッチング波形を図 3 に、昇圧回路の出力特性を図 4 に示す。スイッチングトランジスタの性能向上にともなって、5 MHz という高周波領域でもハードスイッチングを得ることができた。

次に回路シミュレーションによる結果を同じく図 3 および図 4 に示す。回路シミュレーションの結果が実験波形をきわめてよく

再現していることがわかった。スイッチングのスロープの部分は半導体のスイッチング特性をおもに反映しており、その後のリング波形は回路の寄生成分との共振が主たる要因である。1 MHz をこえる高周波領域では半導体素子のデバイスモデルだけでなく回路の寄生成分についても十分に解析をおこなって組み込むことが重要である。

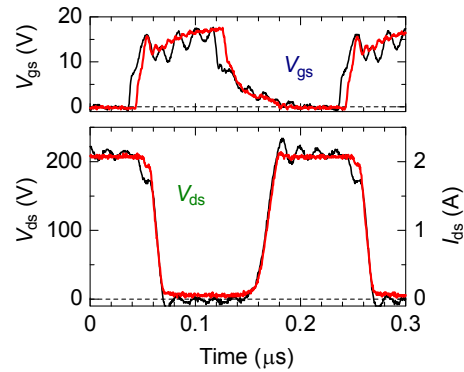


図 5 再製作した昇圧回路におけるトランジスタのスイッチング波形 (寄生インダクタンスを適切に低減することでサージ電圧の大幅な低減を実現した)

構築した回路シミュレーション環境を利用することで、サージ電圧の低減など設計することが可能になる。例えば、昇圧回路においてはスイッチング素子と整流素子との寄生インダクタンスがサージ電圧低減に重要であることが分かった。これは、スイッチング素子と整流素子の間をスイッチングのたびに電流が行き来するためだと考えられる。この知見をもとに昇圧回路を再製作し、そのスイッチング波形の測定結果を図 5 に示す。ドレインソース電圧波形におけるサージ電圧を大幅に低減することに成功した。このようにシミュレーション環境を活用することで、高周波電力変換回路の設計が可能になる。

## (b) SiC BJT の回路応用

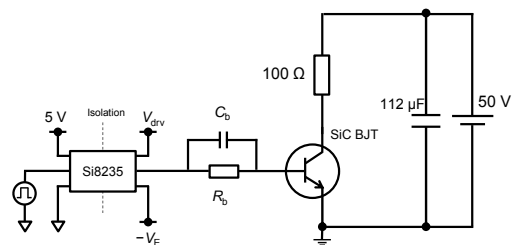


図 6 SiC BJT のスイッチング試験回路

次に SiC BJT のスイッチング特性に注目する。SiC BJT は電流駆動であるため、駆動回路に工夫を要する。SiC BJT のスイッチング試験回路を図 6 に示す。本研究では定常のベ

ース電流をきめるベース抵抗  $R_b$  に加えて、スイッチング時の充放電をはやめるためにスピードアップキャパシタ  $C_b$  を用いる。本実験には、ベース抵抗 470  $\Omega$ 、スピードアップキャパシタ 0.68 nF を用いた。

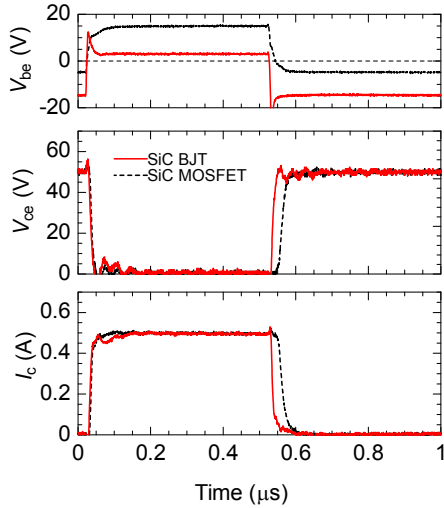


図 7 SiC BJT のスイッチング試験結果

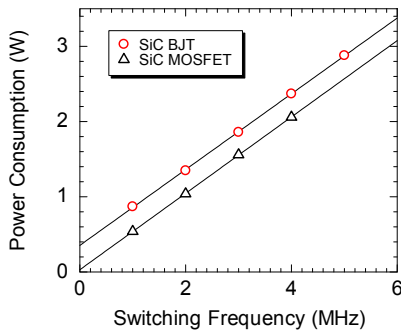


図 8 駆動回路における消費電力

図 7 に SiC BJT のスイッチング試験結果を示す。比較用として SiC MOSFET についても測定した。BJT の駆動電圧には +15 V / -15 V をもち、MOSFET の駆動電圧には +15 V / -5 V を用いた。MOSFET のゲート抵抗には 10  $\Omega$  を用いた。その結果、SiC BJT のターンオフ特性が極めて速いことが分かった。Si パワーBJT では伝導度変調の効果によりターンオフ特性が極めて遅いことが知られていたが、SiC ではキャリア寿命が短いため、キャリアの蓄積時間が短く、速いターンオフが得られたのだと考えられる。

次に駆動回路における消費電力を図 8 に示す。BJT は電流駆動であるため、常にベース電流を供給する必要があるため、駆動回路の損失が大きくなりがちである。一方で、スイッチング周波数の増大につれて、トランジスタの入力容量を充放電するための電力消費が増大する。その結果、1 MHz をこえる高周波領

域では駆動回路における損失が SiC MOSFET とほぼ同程度にまで抑えられることが分かった。

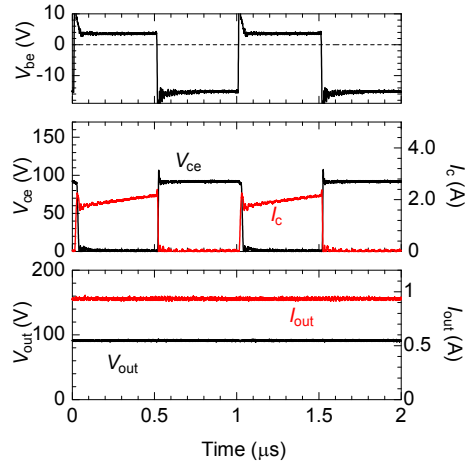


図 9 SiC BJT を用いた昇圧回路におけるスイッチング波形の実測結果

最後に SiC BJT を用いた昇圧回路を製作し、その特性を評価した。入力電圧を 48 V とし、出力 100 W が得られるように設計した。図 9 に製作した昇圧回路の測定結果を示す。動作周波数は 1 MHz とした。SiC BJT の優れたスイッチング特性により、入出力電力の変換効率は 94% と極めて高い値が得られた。

#### まとめ

本研究では SiC BJT を用いた高周波電力変換回路の実現をめざし、高周波スイッチングに対応できる回路シミュレーション環境を構築した。これにより駆動周波数 1 MHz に対応した回路設計が可能である。また、ベース駆動回路を工夫した結果、SiC BJT の高速スイッチングを実現した。製作した昇圧回路は 1 MHz の高い動作周波数でも 94% の変換効率を実現した。SiC BJT の高周波パワースwitching デバイスとしての可能性を示すことができたと考えられる。

#### 5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3 件)

1. Takafumi Okuda and Takashi Hikihara, “Skew Calibration with High-Power and High-Speed Pulse Generator for Oscilloscope”, IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems, Vol. 138, pp.37-40, 2018. (査読あり)
2. Takafumi Okuda, Tsunenobu Kimoto, and Jun Suda, “A Comparative Study on Electrical Characterization of 1-kV pnp and npn SiC Bipolar Junction Transistors”, Japanese Journal

of Applied Physics, Vol.57, 04FR04, 2018. (査読あり)

3. Ryosuke Maeda, Takafumi Okuda, and Takashi Hikihara, "Analysis of Dynamic Characteristics of SiC Schottky Barrier Diodes at High Switching Frequency Based on Junction Capacitance", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.57, 04FF01, 2018. (査読あり)

〔学会発表〕(計 15 件)

1. Takafumi Okuda, Yohei Nakamura, Michihiro Shintani, Takashi Sato, and Takashi Hikihara, "Analysis of Transient Behavior of SiC Power MOSFETs Based on Surface Potential Model and Its Application to Boost Converter", 4th IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications, Arkansas, United States of America, No. 1050, Nov. 8, 2016, oral. (査読あり)
2. Yuhei Sadanda, Takafumi Okuda, Takashi Hikihara, "Direct Drive of a Buck Converter by Delta-Sigma Modulation at 13.56-MHz Sampling", IEEE Workshop on Control and Modeling for Power Electronics, Stanford, California, United States of America, P05-8, July 9-12, 2017, poster. (査読あり)
3. Kazuki Hashimoto, Takafumi Okuda, and Takashi Hikihara, "A Study on Origin of Oscillation of Voltage Waveforms in Flyback Converter", 2017 Taiwan and Japan Conference on Circuits and Systems (TJCAS2017), Okayama, Japan, IC-6, Aug. 21-23, 2017, poster. (査読あり)
4. Ryosuke Maeda, Takafumi Okuda, and Takashi Hikihara, "Analysis of Dynamic Characteristics of SiC SBD at High Switching Frequency Based on Junction Capacitance", 2017 International Conference on Solid State Devices and Materials, Sendai International center, Japan, PS-5-04, Sep. 21, 2017, poster. (査読あり)
5. Takafumi Okuda, Tsunenobu Kimoto, and Jun Suda, "Investigations on Electrical Characteristics of 1-kV pnp SiC BJTs Compared with npn SiC BJT", 2017 International Conference on Solid State Devices and Materials, Sendai International center, Japan, N-5-04, Sep. 22, 2017, oral. (査読あり)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

研究室ホームページ

<http://www-lab23.kuee.kyoto-u.ac.jp/ja/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

奥田 貴史 (Okuda Takafumi)

京都大学 大学院工学研究科 助教

研究者番号 : 00783036

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

なし