

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04415

研究課題名（和文）光駆動SiCパワースイッチ

研究課題名（英文）Optically-driven SiC power switches

研究代表者

矢野 浩司（Yano, Koji）

山梨大学・大学院総合研究部・教授

研究者番号：90252014

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、SiC素子を用いた電力変換回路における寄生素子のスイッチング動作への影響を低減することを目的とし、SiC-JFETとSiバイポーラトランジスタのカスコードスイッチを光パルスで駆動するスイッチングデバイス(Optically driven cascode switch:ODCS)を提案した。そしてODCSを用い、ハーフブリッジのインバータ回路を試作した。その結果、インバータ回路の基本動作を確認することができた。ODCS中のバイポーラトランジスタのベース・エミッタ端子に並列にシャント抵抗 R_s を挿入し、 R_s を調整することにより回路の変換効率とターンオフ遅延時間を最適化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果を既存の電力変換回路に適用することにより、駆動回路中の配線に関連する寄生素子を低減できるため、特にワイドバンドギャップ半導体を用いた電力変換回路の高周波化が期待できる。これによりフィルターを縮小でき、変換回路自体のサイズを縮小することが可能となる。同時にワイドバンドギャップ半導体を使用したパワーモジュールでチップを並列接続した際に、チップ間の動作の不均衡を回避することができるため、ワイドバンドギャップパワーモジュールにおける電流容量の増加に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：In order to decrease influence of parasitics on the switching operation of power conversion circuits, we proposed a novel switching device (optically driven cascode switch: ODCS) that uses optical pulses to drive a cascode switch of SiC-JFETs and Si bipolar transistors. Using the ODCS, a prototype half-bridge inverter was developed, and then the basic operation of the inverter was confirmed. A shunt resistor, R_s , is inserted in parallel with the base and emitter terminals of the bipolar transistor in the ODCS, and the conversion efficiency and turn-off delay time of the circuit are optimized by adjusting R_s .

研究分野：半導体工学

キーワード：パワーデバイス SiC ワイドバンドギャップ

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

パワー半導体デバイスは、家電、自動車、送配電、電源など様々な分野における電力変換器で使用され、パワー半導体デバイスの高性能化により変換器の電力ロスを削減でき省エネルギー化に貢献することができる。従来、パワーデバイス全体の90%以上がシリコン(Si)を材料に用いたものであったが、Siは物性値に起因する性能限界が近づいてきている。そこで性能の大幅な改善のため近年、炭化ケイ素(SiC)や窒化ガリウム(GaN)といった新たな半導体材料を用いた電力ロスの低く高速スイッチング性能を有するパワートランジスタが開発されている。パワーデバイスの高速スイッチング動作が進むにつれて、電圧駆動方式では回路中の配線インダクタンスや寄生容量の影響により、ノイズの発生や並列接続チップの動作アンバランスの問題が顕在化している。

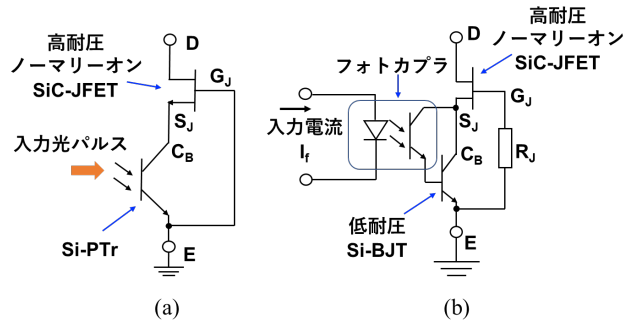


図1 SiC-ODCSの回路構成

2. 研究の目的

本研究では新しいパワーデバイスとして、図1(a)に示すような高耐圧ノーマリーオンSiC-JFETと低耐圧Siフォトトランジスタ(Si-PTr)を直列接続し、同カスコードスイッチをダイレクトに光駆動する光スイッチ(Optically Driven SiC Cascode Switch: SiC-ODCS)を提案する。これにより駆動回路における電氣的な配線を大幅に削除できるため、寄生素子の影響を低減でき、電力変換器の動作周波数の増加やパワーモジュールの電流容量の増加が期待できる。本研究では、同図(b)に示すように、低耐圧Si-BJTとフォトカプラの出力段をダーリントン接続し、SiC-JFETとカスコード接続し、実質的に同図(a)のスイッチと等価な機能を有するSiC-ODCSを用いてハーフブリッジインバータ動作を検証した。

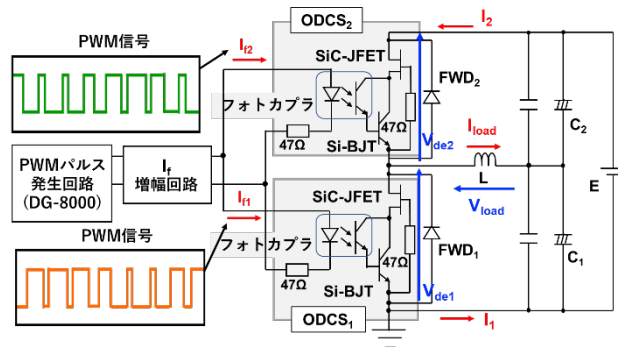


図2 SiC-ODCSを用いたハーフブリッジインバータ回路

3. 研究の方法

SiC-ODCSに使用したSiC-JFETおよびSi-BJTは市販のものであり、それぞれIJW120R100T1(1.2kV, 26A)およびMJE200G(40V, 5A)である。ハーフブリッジインバータの動作条件は電源電圧40V、誘導負荷0.4mH、キャリア周波数 $f_c = 8.5$ kHz、変調周波数 $f_s = 100$ Hz、変調度=80%、dead time=10 μ sとした。試作したハーフブリッジ回路図を図2に示す。

4. 研究成果

図3に、SiC-ODCSを用いて作成されたハーフブリッジインバータにおける、位相0°および90°付近の下アームODCSの電流波形を示す。ここで下アームがアクティブに働いている期間の位相を前半の半周期、すなわち0°~180°としている。

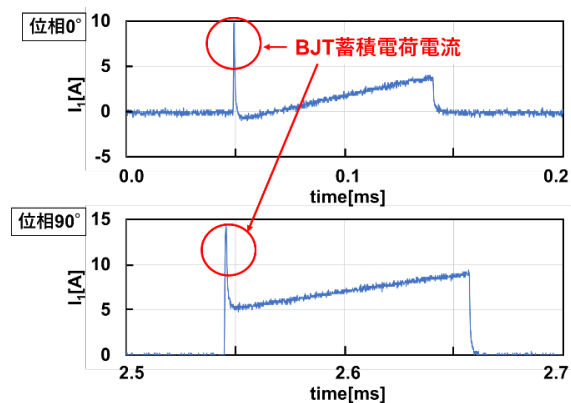


図3 各位相での下アームODCS電流 I_1 のスイッチング波形

同図より電流 I_L の立ち上がり部で過電流が流れていることがわかる。これは、回路の変換効率や信頼性の低下の原因となる。この原因は、もう一方の非アクティブアームである上アームの ODCS にゲートターンオン電圧が印加された期間において ODCS 中の BJT に蓄積された電荷が下アームの ODCS がターンオンした瞬間にその ODCS を介して放出されているためである。ODCS の位相 0° および 90° 付近の電流波形を示す。この過電流の問題は、非アクティブのアームの ODCS にはゲート信号を入力しないように駆動回路を修正することにより、回避することができた。

ODCS のもう一つの問題は、ターンオフ時間が数十 μs と長いことである。これはハーフブリッジインバータの高周波化や大電流容量化を妨げる要因となる。この原因は、ODCS のオン動作時に ODCS 中の BJT 中に過剰な電荷が蓄積され、ターンオフ期間でこの蓄積電荷を引き抜くのに時間を要するためである。この問題の一つの対策は、図 5 に示すように ODCS 中の BJT のベース・エミッタ間にシャント抵抗 R_s を挿入することである。このシャント抵抗により、ODCS がオン状態において、BJT のベース電流の一部を R_s に分岐し、BJT の蓄積電荷を減らせるとともに、ターンオフ時には BJT の蓄積電荷を R_s を介して急速に放出することが可能となる。一方で、 R_s の挿入は ODCS のオン抵抗を増加させる要因となる。図 6 は R_s に対する負荷電流波形の依存性であるが、 R_s の減少と共に ODCS のオン抵抗が増加し、結果として負荷電流の振幅が減少している。従って R_s の最適化が必要となる。図 7 は R_s に対する ODCS のターンオフ遅延時間とハーフブリッジインバータの電力変換効率の関係を示したデータである。この結果より、 R_s の減少によりターンオフ遅延時間が低減できている一方で変換効率が減少している。例えば、 $30\sim 40\ \Omega$ の間で R_s を調整すれば、変換効率が極度に減少せず、遅延時間が低減できることがわかる。

今回の研究では図 1 (b) の ODCS の回路構成の電力変換器への可能性について検証し、電力変換器の基本動作を得ることに成功したが、ODCS のターンオフ時間が長いこと、変換器の高周波化および大電力容量化に対しては十分ではないことが明らかとなった。今後は図 1 (a) の ODCS 回路構成にて、SiC-JFET および Si-ホトトランジスタ (Si-PTTr) の素子構造設計により、ODCS のターンオフ速度の改善を図っていく。

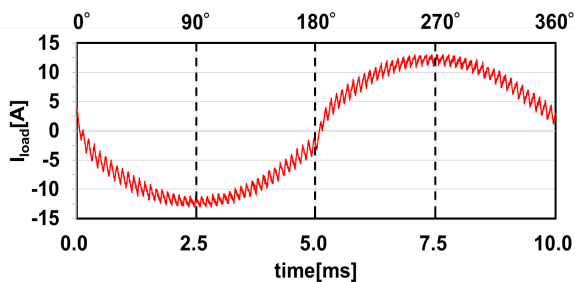


図 4 ハーフブリッジインバータの負荷電流波形

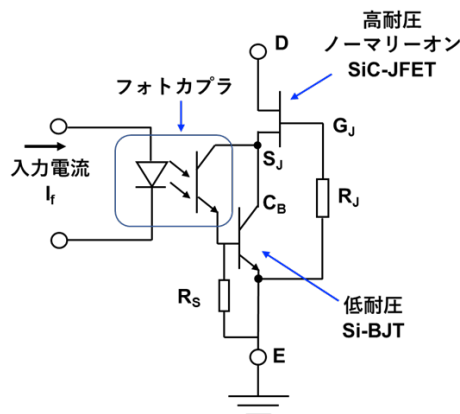


図 5 ODCS へのシャント抵抗 R_s の挿入

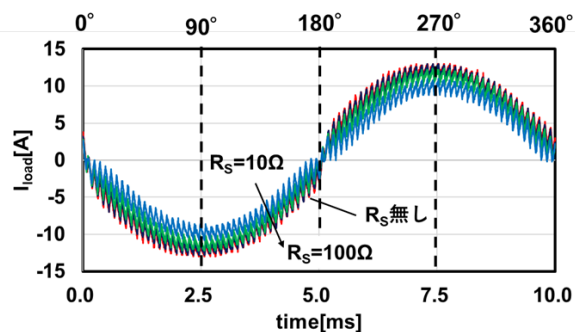


図 6 R_s に対する負荷電流波形

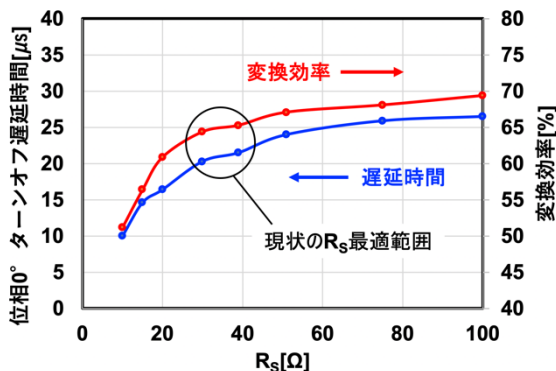


図 7 R_s に対する ODCS のターンオフ遅延時間とハーフブリッジインバータ変換効率

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 鈴木惇哉・松本 俊・矢野浩司
2. 発表標題 光駆動SiCカスコードスイッチによるハーフブリッジインバータ
3. 学会等名 2022年 電気学会 産業応用部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木惇哉・松本 俊・矢野浩司
2. 発表標題 光駆動SiCパワースwitchを用いた ハーフブリッジインバータ回路の検証
3. 学会等名 電気学会静岡東部支所・山梨支所研究発表会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

山梨大学研究者総覧：矢野浩司 http://nerdb-re.yamanashi.ac.jp/Profiles/336/0033565/profile.html

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	松本 俊 (Matsumoto Takashi) (00020503)	山梨大学・大学院総合研究部・教授 (13501)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	田中 保宣 (Tanaka Yasunori)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・先進パワーエレクトロニクス研究センター・研究センター長 (82626)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関