

氏名	杉村 佳奈子
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	甲 第 707 号
学位授与の日付	平成 31 年 3 月 20 日
学位授与の要件	信州大学学位規程第 5 条第 1 項該当
学位論文題目	MHz 帯電力用鉄系メタルコンポジット磁心に関する研究
論文審査委員	主査 教授 佐藤 敏郎 教授 水野 勉 准教授 曾根原 誠 准教授 宮地 幸祐 教授 舟木 剛 (大阪大学)

## 論 文 内 容 の 要 旨

電源システムを構成する DC-DC コンバータのスイッチング周波数の高周波化により小型軽量のリアクトルやトランスの採用が可能となり、電源の小型軽量化を実現できる。これまで Si パワーエレクトロニクスで多用されてきた数十 kHz から 1 MHz の周波数領域から、SiC/GaN パワーデバイスの登場によりスイッチング周波数を MHz 帯以上に高周波化することが可能となり、電源システムの飛躍的な小型軽量化に対する期待が高まっている。

しかしながら、1 MHz を超える MHz 帯以上の周波数では、実質的に Ni-Zn フェライトしか磁心材料の選択肢がないのが実情である。Ni-Zn フェライトは 300°C 前後の低いキュリー温度とホプキンソン効果のために、100°C 以上では鉄損の温度係数が正となって熱暴走するリスクがある。高温動作が可能な SiC/GaN をはじめとするワイドバンドギャップパワー半導体の長を活かして電源システムを構成するには、磁心材料にも同様の高温動作特性が求められるものの、Ni-Zn フェライトをインダクタやトランスに採用する場合には熱暴走を抑制するための磁心冷却や、磁束密度振幅を小さくして鉄損による温度上昇を避けるなどの対策が必要であり、電源システムの小型化軽量化を大きく阻害する。

本研究は、微細鉄系磁性粉末/非磁性耐熱樹脂からなる MHz 帯電力用鉄系メタルコンポジット磁心を開発し、MHz 帯スイッチング電源への適用を通して開発材料の有用性を実証することを目的に行ったものである。

学位論文の第 1 章では、次世代パワーエレクトロニクスの現状と、磁心材料の視点で整理した課題を述べた。

第 2 章では、鉄系メタルコンポジット磁心に採用した微細鉄系磁性粉末の材料物性および微細鉄系磁性粉末への高抵抗被膜処理について述べた。MHz 帯低鉄損コンポジット磁心材料を実現するには、複数の粉末を跨いで流れるうず電流を抑制するために粉末表面に高抵抗被膜を形成してうず電流を粉末粒子内に閉じ込めることが必須であり、同時に高周波化に対応するためには微細粉末の採用が必要である。本研究では、軟磁性金属磁性粉末の中で最も微細な 1-3  $\mu\text{m}$  サイズを選択できるカルボニル鉄粉と鉄系アモルファス合金粉を採用した。カルボニル鉄粉は 2 T という高い飽和磁化を持っていることが最大の特徴であり、ナノ結晶に由来して保磁力は 240 A/m (3 Oe) 程度と小さいが、鉄系アモルファス合金粉に比べれば 2 倍近く保磁力が大きい。一方で、鉄系アモルファス合金粉は非晶質であるため低保磁力の特長を有するとともに、カルボニル鉄粉の 10 倍以上の体積抵抗率を有するので、粉末表面の高抵抗化が可能であれば鉄系メタルコンポジット磁心のうず電流損を大きく低減できる。本研究では、微細鉄系磁性粉末への高抵抗被膜処理としてシリコーティング、大気中表面酸化および二段階酸溶液処理表面修飾の三種類の高抵抗被膜形成法

の検討を行った。シリカコーティングは絶縁性の高い  $\text{SiO}_2$  を被覆できるものの、粒子表面の凹凸が大きいと均一なコートが困難になる。カルボニル鉄粉の大気中表面酸化では、表面に  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  と  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  の混相被膜が形成され、 $200\text{-}240^\circ\text{C}$  が結晶粒成長による保磁力の増大を避ける熱酸化温度範囲であることを見出した。鉄系アモルファス合金粉の大気中表面酸化では、 $\text{Fe-O}$ 、 $\text{Si-O}$  からなる緻密な高抵抗ガラス相を形成し、厚膜化は難しいものの、熱酸化と同時に粉末内部の応力緩和によって保磁力が減少する。二段階酸溶液処理表面修飾は上記処理方法の欠点をカバーし、粒子表面をシリカ被膜に改質することにより高抵抗被膜を形成できるが、他の二つの方法に比べてプロセスが複雑である。

第3章では、シリカコーティングおよび大気中表面酸化で高抵抗被膜形成した磁性粉末を採用し、鉄系メタルコンポジット磁心を試作・評価した結果を述べた。表面酸化カルボニル鉄粉コンポジット磁心は  $\text{Ni-Zn}$  フェライト磁心に対し透磁率および電気抵抗率は低いが、飽和磁化は5倍、保磁力は  $1/2.5$ 、MHz 帯鉄損は  $1/4$  であった。表面酸化鉄系アモルファス合金粉コンポジット磁心は、 $\text{Ni-Zn}$  フェライトに対し体積抵抗率はほぼ同等、飽和磁化は4倍であり、MHz 帯鉄損は  $1/6$  であった。MHz 帯におけるベンチマーク磁心である  $\text{Ni-Zn}$  フェライトに対し、試作した鉄系メタルコンポジット磁心はいずれの磁気特性においても優位性があることが示された。

第4章では、表面酸化鉄系アモルファス合金粉コンポジット磁心を  $48\text{ V}$  入力- $24\text{ V}$  出力 MHz 帯スイッチング LLC 共振型 DC-DC コンバータに適用して評価した結果を述べた。表面酸化被膜付鉄系メタルコンポジット磁心トランスを使用したコンバータは、全出力範囲で  $\text{Ni-Zn}$  フェライトを採用した場合を上回る効率を示し、 $36\text{ W}$  出力時に最大効率  $93.1\%$ 、 $24\text{-}120\text{ W}$  の出力範囲で  $90\%$  以上の効率を示した。 $120\text{ W}$  出力時の表面酸化被膜付鉄系メタルコンポジット磁心トランスの効率は  $97\%$  以上であることを示した。

第5章で本学位論文の結論を述べた。