

学位論文の審査結果の要旨

SiC/GaNワイドバンドギャップパワー半導体の登場により、スイッチング周波数をMHz帯に高周波化した小型軽量スイッチング電源システムに対する期待が高まっている。MHz帯以上の周波数では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が、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以上で鉄損の温度係数が正となって熱暴走するリスクを持っており、新規のMHz帯電力用磁心材料の実現に大きな期待が寄せられている。

本論文は、Ni-Znフェライトを代替する新しいMHz帯電力用磁心材料として鉄系メタルコンポジット磁心を提案し、MHz帯スイッチング電源への適用をとおして開発磁心材料の有用性を実証することを目的に検討した結果をまとめたものである。

第1章では緒言として、地球環境問題と次世代パワーエレクトロニクスへの期待について概観し、高効率エネルギー利用システムを実現する次世代パワーエレクトロニクスにおけるリアクトル/トランス用磁心材料の課題を整理するとともに、MHz帯スイッチング電源システムを実現するボトルネックとして電力用磁心材料の課題を述べている。また、内外の研究を参照して研究開発の指針を整理し、本研究の目的を示している。

第2章では、MHz帯電力用鉄系メタルコンポジット磁心に採用する微細球形磁性粉末の物性評価と高抵抗被膜処理技術について詳述している。MHz帯低鉄損コンポジット磁心材料を実現するには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とともに、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、軟磁性金属磁性球形粉末の中で最も微細な1~3 μm サイズを選択できるカルボニル鉄粉と水アトマイズ法鉄系アモルファス合金粉末を採用し、TEOS加水分解によるシリカコーティング技術、大気中熱処理による熱酸化被膜形成技術、リン酸/塩酸による二段階酸溶液処理によるシリカ単相被膜形成技術を開発し、粉体抵抗によって評価している。合金組成にSiを含有する鉄系アモルファス合金粉末に対する300°C・3時間大気中熱処理によって形成される熱酸化被膜はFe-O、Si-Oからなる10nm厚の緻密なガラス相で構成され、シリカ被膜に匹敵する粉体抵抗を有することを見出した。本方法は乾燥空气中熱処理という簡便な方法でシリカに匹敵する高抵抗被膜形成が可能であり、磁性粉末前処理の低コスト化に繋がると期待される。同様の方法によるカルボニル鉄粉の熱酸化被膜は抵抗率の低いFe₂O₃とFe₃O₄からなるために、熱酸化被膜処理鉄系アモルファス金属粉末に比べて粉体抵抗が1桁程度低いことを明らかにしている。また、鉄系アモルファス合金粉末に対するリン酸/塩酸による二段階酸溶液処理では合金組成に含まれるSi自身が酸化されてシリカ単相被膜を形成することを明らかにした。本方法では30~80nmのシリカ単相被膜が形成され、同一厚さのTEOS加水分解法シリカ被膜に匹敵する粉体抵抗を示すことを明らかにした。TEOS加水分解および二段階酸溶液処理で形成されるシリカ被膜は圧縮応力を有し、逆磁歪効

果によって磁性粉末の保磁力が増大する。一方、熱酸化法は熱処理による粉末内部応力の緩和によって保磁力が減少し、高抵抗被膜付き低保磁力磁性粉末を得る方法として熱酸化法が優れると述べている。

第3章では、鉄系メタルコンポジット磁心の試作と評価について述べている。エポキシ前駆体と磁性粉末による混合スラリを大気圧中で鋳型に流し込んで熱硬化・リリースするキャスト法バルクコンポジット磁心作製技術を開発し、シリカ被膜ならびに熱酸化被膜が形成されたカルボニル鉄粉および鉄系アモルファス合金粉末を採用して高耐熱エポキシ樹脂をバイндаとする鉄系メタルコンポジット磁心を試作し、静磁化特性、複素透磁率、MHz帯鉄損特性を評価している。球形磁性粉末の集合体であるコンポジット磁心は粉末最密充填においても個々の粉末の反磁界効果が残存するため、磁気飽和しにくい恒透磁率特性を有する低透磁率磁心として振る舞う。試作したコンポジット磁心の代表的な特性を列挙すると、平均サイズ1.6 μm のカルボニル鉄粉はピーキーな粒度分布を有するためにキャスト法で実現可能なコンポジット中の粉末充填率は50 vol.%となり、熱酸化カルボニル鉄粉/エポキシコンポジット磁心の比透磁率は6程度で周波数100MHzまで一定、磁束密度振幅20mTで評価されたMHz帯鉄損はベンチマークであるNi-Znフェライト磁心の1/4であった。また、平均サイズ2.4 μm の水アトマイズ法鉄系アモルファス合金粉末はブロードな粒度分布によってコンポジット中の粉末充填率は65 vol.%となり、熱酸化鉄系アモルファス合金粉末/エポキシコンポジット磁心の比透磁率は10程度であり100MHzまで一定、磁束密度振幅20mTで評価されたMHz帯鉄損はベンチマークであるNi-Znフェライト磁心の1/6であった。

第4章では、試作した鉄系メタルコンポジット磁心の中で透磁率、MHz帯鉄損で最も優れる熱酸化鉄系アモルファス合金粉末/エポキシコンポジット磁心を採用してリーケージトランスを試作し、48V入力-24V・120W出力のGaNパワーデバイスMHzスイッチングLLC共振型コンバータへの適用と評価を行った結果を述べている。本研究で試作されたリーケージトランスを採用した場合、20~120Wの広い出力電力範囲で90%以上の高い電力変換効率が得られるとともに、トランスの伝送電力効率は97%以上、トランス伝送電力をコンポジット磁心体積で除した電力密度は90W/cm³に達することを示した。ベンチマークであるNi-Znフェライトを用いた場合は電力変換効率が低だけでなく、磁心の温度上昇のため70W以上の出力が困難であった。

第5章では本論文の結言として、本研究で得られた成果をまとめるとともに開発した鉄系メタルコンポジット磁心がMHz帯電力用磁心のベンチマークであるNi-Znフェライトに対して明確な優位性があることを述べ、次世代パワーエレクトロニクスの基盤技術を確立したと結んでいる。

本論文は、申請者を筆頭著者とする学術雑誌審査付き論文3件（AIP Advances, IEEE Transactions on Magnetics）ならびに第2著者である学術雑誌審査付き論文1件（IEEE Transactions on Magnetics）をもとにまとめられており、次世代パワーエレクトロニクスの基盤技術として新規の高周波電力用磁性材料の実現に大きな貢献を果たしているものと認められ、2件の受賞があるなど当該分野での評価も高い。

以上から、杉村佳奈子氏から提出された学位論文は学位論文審査委員会全員一致で博士学位論文としてふさわしいと判断された。

公表主要論文名

- Kanako Sugimura, Yuki Miyajima, Makoto Sonehara, Toshiro Sato, Fumitaka Hayashi, Nobuyuki Zettsu, Katsuya Teshima, Hideaki Mizusaki,
Formation of high electrical-resistivity thin surface layer on carbonyl-iron powder (CIP) and thermal stability of nanocrystalline structure and vortex magnetic structure of CIP
AIP Advances, Vol. 6, No. 5, 055932 , 8 pages, May 2016. (2016年5月発行に掲載)
- Kanako Sugimura, Daisuke Shibamoto, Naoki Yabu, Tatsuya Yamamoto, Makoto Sonehara, Toshiro Sato, Tsutomu Mizuno, Hideaki Mizusaki
Surface-Oxidized Amorphous Alloy Powder/Epoxy-Resin Composite Bulk Magnetic Core and Its Application to Megahertz Switching LLC Resonant Converter
IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 53, No. 11, 2801406, 6 pages, Nov. 2017. (2017年11月発行に掲載)
- Kanako Sugimura, Naoki Yabu, Makoto Sonehara, Toshiro Sato
Novel Method for Making Surface Insulation Layer on Fe-Based Amorphous Alloy Powder by Surface-Modification Using Two-Step Acid Solution Processing
IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 54, No. 11, 2801805, 5 pages, Nov. 2018. (2018年11月発行に掲載)
- Naoki Yabu, Kanako Sugimura, Makoto Sonehara, Toshiro Sato
Fabrication and Evaluation of Composite Magnetic Core Using Iron-Based Amorphous Alloy Powder With Different Particle Size Distributions
IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 54, No. 11, 2801605, 5 pages, Nov. 2018. (2018年11月発行に掲載)