

氏名	すずき よういちろう
授与学位	鈴木 洋一郎 博士(工学)
学位授与年月日	平成29年3月24日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) ナノメカニクス専攻
学位論文題目	低誘電率高多層構造を用いたマイクロデバイスの研究
指導教員	東北大学教授 桑野 博喜
論文審査委員	主査 東北大学教授 桑野 博喜 東北大学教授 小野 崇人 東北大学教授 羽根 一博 東北大学教授 高 偉 東北大学准教授 北吉 均

論文内容要旨

近年の電子機器の小型化、高速化といった目覚ましい発展は、半導体の微細化技術の進歩に加えて、これらの各電子部品を高密度かつ低コストに接続する基板実装技術の進歩を見逃してはならない。高集積化、高速化された半導体集積回路の特性を引き出すためには配線密度が高く高周波特性を損なわない基板実装技術が必要となっている。現状、高周波特性に優れた低誘電率基板として、様々な研究開発が進められているが、従来の低誘電率高多層構造においては、一定の低誘電率は得られるものの、多層化する際のプロセスにおいて複雑化することが避けられず、高コストであること、また、多層化プロセスにおいて接着層が入るため、不均一な特性となり高精度な高周波設計が難しいことが課題となっている。本論文では、低誘電率の基板材料であり、且つ、接着層などの混ざりものを一切使わず低コストな製造方法にて高多層構造を実現できる技術として、PALAP (Patterned prepreg Lay up Process) に着目した。PALAP とは株式会社デンソーにより開発された基板積層プロセス技術の総称であり、本論文では略称の「PALAP」、PALAP を用いて作製した多層基板を「PALAP 基板」と称して述べている。PALAP はパターン加工したシートを一度にプレス成型する工法であり、熱可塑性樹脂基板と焼成型金属ペーストを用いて3次元での一括接続を可能とする。基板材料は LCP(液晶ポリマー)であり、比誘電率=3.0 と低く、また、従来の積層プロセスとは異なり、接着層などを一切持たず、一括熱プレスによって非常にシンプルな工程にて多層化を実現できるため、低コストである。さらには、低コストな方法で電子部品の内蔵実装が可能であることも特長である。本論文では、低誘電率で且つ低コストな製造方法で高多層構造が実現できる PALAP に着目し、PALAP 基板による低誘電率多層構造を用いたマイクロデバイスとして、小型電流センサおよび小型エネルギーハーベスタの開発に取り組んだ。

まず、電流センサの開発について述べる。近年の自動車は、電気自動車やハイブリッドカーの実用化に見られるように燃費向上や排気ガスにおける有害物質低減など環境性能の向上が目覚ましい。その中核を担うインバータや DC-DC コンバータ等パワーエレクトロニクス機器においては、高効率化と小型化の両立が求められており、そこでキー技術となるのがインバータ回路のスイッチング速度を上げることでスイッチング損失を低減する高速スイッチング技術である。スイッチング素子においても、従来の IGBT や MOS に比べて、一桁近い高速スイッチングが期待できる GaN、SiC、SJ-MOS 等次世代素子の開発が進められている。しかしながら、ス

スイッチング速度を高速化することの背反として、スイッチング後に高周波のリングングが発生し、リングング成分によるノイズ増大を招くこととなる。リングング成分によるノイズ増大はフィルタ部品の増大につながるため、スイッチング損失低減（発熱の抑制）とスイッチングノイズ低減（低ノイズ化）を両立できるゲート駆動回路やスイッチング素子構造などスイッチング技術のレベルアップが期待されている。そこで、損失低減と低ノイズ化を両立できるスイッチング技術の開発においては、高周波のリングング成分を含む高速スイッチング電流を高精度に計測評価する電流センシングの技術が必要となってくる。パワーエレクトロニクス回路の大電流を捉える電流センシング方法としては、ログスキーコイル式の電流センサが挙げられるが、従来のセンサでは、次世代の高速スイッチング素子においてスイッチングの立ち上がり立ち下がり周波数も高く、周波数帯域が十分に得られないことが課題となっている。また、パワーエレクトロニクス回路では、大電流を流すため回路配線が持つインダクタンス成分が無視できず、極力短く配線設計をすることが必要となる。従来のセンサではこのような低インダクタンス設計された回路の電流を計測する際、センササイズが大きくなることが課題となっている。

本論文では、高周波まで対応できる小型の電流センサとして、積層基板構造による小型広帯域コイルの実現を目指した。基板には高周波特性に優れており、且つ薄型化が実現できる低誘電率高多層基板として、PALAP による多層基板を用いることを提案した。本研究で開発した積層基板型ログスキーコイルの構造を図 1 に示す。任意の 2 層に基板パターンによって基板平面方向に放射状のラインを、またこれら 2 層の間の 1 層に同様に円周状のラインを形成し、これらの基板パターンを基板厚み方向にビア接続することでログスキーコイルを形成している。基板には PALAP 基板を用いており、低誘電率（ $\epsilon = 3.0$ at 1MHz~10GHz）、低誘電損失（ $\tan \delta = 0.003$ at 1MHz~75GHz）であるためコイルの寄生容量を低減し、高周波化に有利となる。また、基板厚みが極薄（ $50 \mu\text{m}/\text{層}$ ）であるため、小型化にも有利となる。

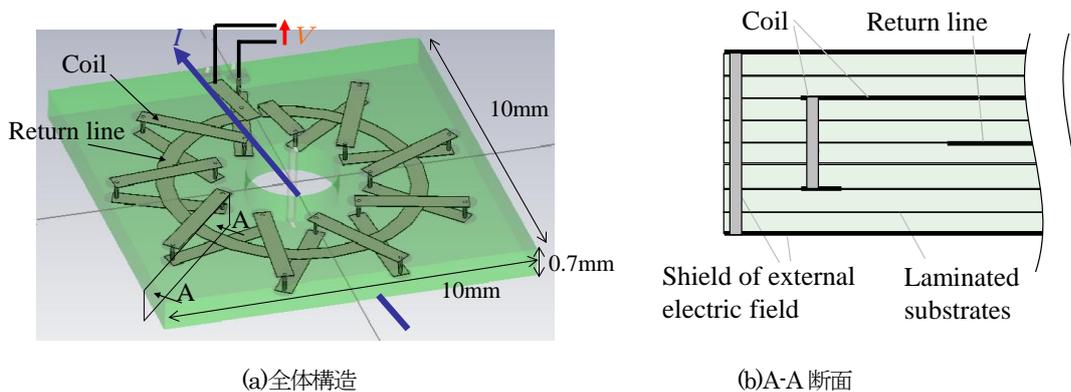


図 1. 積層基板型ログスキーコイルの構造

ログスキーコイルの高周波化においては、コイルの自己インダクタンスと寄生容量を低減することが必要となり、自己インダクタンスの低減については、巻き数の減少、コイル径の減少、コイル線幅の増大が有効である。巻き数及びコイル径の減少については感度の低下が背反となるが、本論文では比較的大電流のセンシングを対象としているため許容している。また、寄生容量の低減については、コイルとシールド面間やコイルと戻り線間の結合容量が支配的であり、基板厚み方向の結合距離の増大や結合面積（コイル線幅）の減少が有効である。本論文では、ログスキーコイル全体を PALAP 基板 14 層で厚み 0.7mm とし、結合容量が最小となるようなコ

イル形成層の検討、および高周波特性が最適となるようなコイル線幅の検討をシミュレーションにより実施した。また、シミュレーション設計したコイル構造において、実際に PALAP 基板を用いて積層基板型ロゴスキーコイル式電流センサを試作し、周波数特性を評価した。試作した電流センサの概観写真を図 2 に示す。PALAP 基板 14 層の積層構造とし、厚み 0.7mm、ロゴスキーコイル部のサイズが 10mm×10mm となっている。検出する電流ラインはφ2.4mm の中心穴に通して、電流センシングする構成となる。図 3 に電流センサ試作品の周波数特性実測結果を示す。周波数特性はネットワークアナライザを用いた S パラメータ通過特性(S_{21})にて評価しており、電流センサ試作品(PALAP 基板の積層基板型ロゴスキーコイル)において、1.2GHz まで良好な直線性(誤差±5%以内の周波数範囲)を持つことが確認でき、目標帯域とした 1GHz 以上を達成できることを実機にて明らかにした。

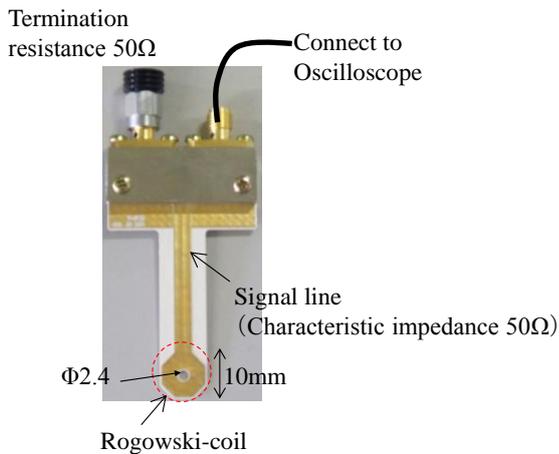


図 2. 試作した電流センサ

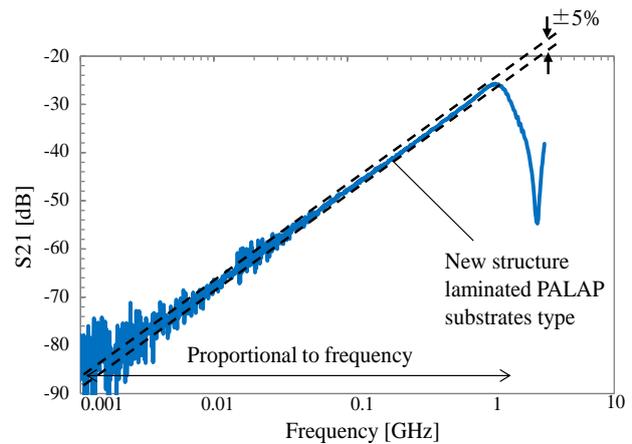


図 3. 電流センサ試作品の周波数特性実測結果

次に、エネルギーハーベスタの開発について述べる。近年、振動エネルギーを利用したエネルギーハーベスティング技術の研究開発は盛んに進められているが、自動車においても電力供給が困難なシステムの代表として、タイヤに搭載されるタイヤ空気圧モニタへの適用が望まれる。タイヤ内において豊富な電力が得られれば、タイヤ空気圧の情報に加えて、例えば走行制御において重要な路面情報をセンシングするなど付加価値を高められる可能性があり、適用メリットは大きいと考えられる。タイヤ内においては豊富な振動エネルギーが得られるが、振動発電の方式については各方式が研究開発されている。安価な材料で実現でき、発電密度も比較的高い方式が電磁誘導方式および圧電方式であり、圧電方式は比較的小型化に向いているが、電磁誘導方式はコイルの体積が大きくなるため小型化が課題となっている。本論文では、圧電方式と電磁誘導方式を組み合わせることで安価で且つ高出力と小型化を両立する構造を最終的な素子構造として想定し(図 4)、小型化において課題となる電磁誘導方式にフォーカスした時に、PALAP 基板を用いた積層基板型小型コイルを適用することで電磁誘導方式の振動発電デバイスの小型化を目指した。PALAP 基板を用いた薄型のコイルに、PALAP 基板の部品内蔵実装可能である特長を活かして磁性体材料をコイル内部に組み込む構造とし、外部振動によって磁石と磁性体との距離を変化させることで積層基板型コイル内部の磁束量を変化させ発電させる構造を提案した。本デバイス構造において重要となる、磁石と磁性体との距離の変化に対するコイル内部の磁束変化の関係について、静磁場シミュレーションにて明らかにし、その後、発電デバイスを試作し出力特性を実機検証した。試作品評価においては、加振機での原理検証および、タイヤ内部への搭載を想定したタイヤ振動模擬実験を実施した。図 5 に試作品と実験構成、図 6 に実験結果を示す。20km/h 走行相当の振動から約 1.7

μW の出力が得られ、タイヤ空気圧モニタの電源として適用可能なレベルである無線機を約1分に1回動作可能であることを実機にて明らかにした。

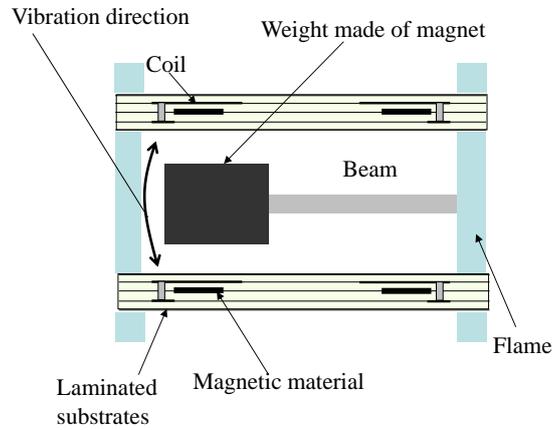


図4. 振動発電デバイス構造

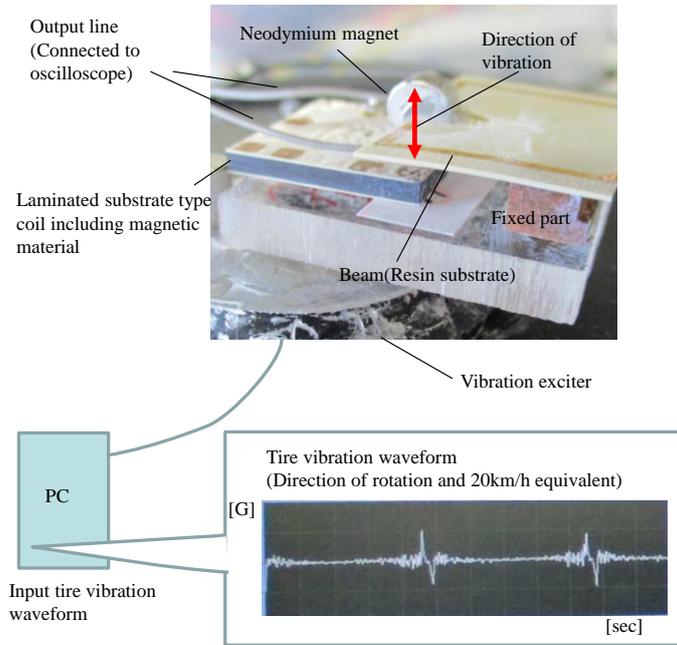


図5. 発電デバイス試作品とタイヤ振動模擬実験の構成

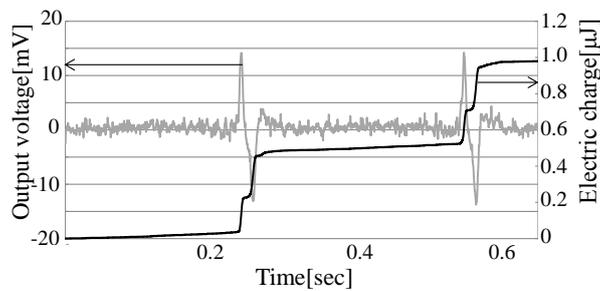


図6. タイヤ振動模擬実験での発電デバイス試作品の出力結果

論文審査結果の要旨

近年の自動車においては電子化、電動化、情報化が著しく進展している。特に車載機器では、限られたスペースの中で電子機器の小型化、高速化といった目覚ましい発展があり、電子部品を高密度且つ低コストに接続する基板実装技術の発展を促し、高周波特性に優れた低誘電率基板が開発されている。一方でスイッチ高速化に伴い、スイッチング後に高周波のリングングが発生し、ノイズ増大が課題となる。そのため、高精度に高周波リングング成分を計測評価する技術が必要となる。また、近年、自動車に関連するあらゆる情報をセンシングし高度な制御に適用することにより環境性能や安全性能に画期的な向上を図ることが期待されている。本論文では、高周波車載機器開発のための計測評価技術確立を目的として高周波リングングが計測できる低誘電率多層構造を用いた電流センサの考案・開発および、振動エネルギーを利用したエネルギーハーベスタの一つとして、低誘電率多層構造の適用による電磁誘導型ハーベスタを考案・開発し、その有効性を明らかにするものであり、全編5章からなる。

第1章では、序論として本研究の背景、目的および課題と各章における具体的な研究の内容について述べている。

第2章では、高周波に適した低コスト基板について述べている。高周波特性に優れた低誘電率基板を用いて多層化する技術、部品内蔵実装する技術を比較検討されており、高密度実装、コストの観点から液晶ポリマーを用いて、接着層が不要な一括熱プレスにて積層化するPALAP (Patterned prepreg Lay up Process) が最も有利であると結論されている。これは本論文において電流センサおよび小型振動発電デバイスの設計指針を与えるとともに、高周波基板開発において工学上重要な知見である。

第3章では、高周波パワーエレクトロニクス回路を開発するための高周波リングング電流高精度センシングについて述べている。パワーエレクトロニクス回路の大電流を高精度にセンシングする方法として次世代の高速スイッチング素子にも適用可能なPALAP基板を用いた積層基板型コイルによるロゴスキー型電流センサを考案し、シミュレーションを含む理論的検討、試作による実験的検討を行っている。コイルを形成する層と結合容量との関係、またコイル線幅と周波数特性との関係を明らかにし、センサ試作により基板厚み0.7 mm、帯域1.2GHzを実証している。これは車載機器の高周波化進展を可能とするとともに一般のパワーエレクトロニクス技術発展の観点からも重要な知見、成果である。

第4章では、振動エネルギーを利用したエネルギーハーベスティング技術について述べている。特に配線が不可能なタイヤ空気圧モニタへの適用を目的としてタイヤ内における豊富な振動エネルギーを利用して発電する電磁誘導方式の小型化のために低誘電率積層基板構造を採用した小型振動発電デバイスを考案し、理論的検討および実験的検討を行なっている。PALAP基板により積層基板構造のコイルを形成し、さらに部品内蔵実装の特徴を生かして、コイル内部に磁性体部品を内蔵した小型コイルを提案し試作している。積層基板型コイル内部を通る磁束を変化させ、起電力を得るデバイス構成により、加振機での原理検証および、タイヤ内部を想定したタイヤ振動実験により、20km/h走行相当の振動から1.7 μ Wの出力を得てタイヤ空気圧モニタ電源として適用可能なレベルであることを実証している。これは、現在のタイヤ空気圧モニタの発展形や将来の自動運転を考える上で、工学上重要な知見と設計指針を与える成果である。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、高密度実装およびコストに優れた低誘電率液晶ポリマーを多層構造とした基板を用いて高周波パワーエレクトロニクス回路を開発するためのロゴスキー型電流センサを開発し、高周波リングング電流の高精度計測に成功し、さらに、将来の自動運転に資するセンシング技術として振動エネルギーを利用したエネルギーハーベスティング技術について積層基板を用いたコイルにより電磁誘導発電デバイスを考案・開発し実環境を模した振動により実用の可能性を実証しており、車載機器高度化に有用な要素技術およびシステム化技術の進展に寄与し、ナノメカニクスおよび情報ナノシステム学の発展に貢献するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。