

氏名	堀 元人
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記番号	医工農博甲第105号
学位授与年月日	令和4年9月27日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
専攻名	機能材料システム工学専攻
学位論文題目	パワーモジュール絶縁基板の絶縁破壊に影響を及ぼす諸因子に関する研究
論文審査委員	主査 教授 鍋谷 暢一 教授 矢野 浩司 准教授 村中 司 准教授 白木 一郎 特任教授 松本 俊 教授 佐藤 隆英

## 学位論文内容の要旨

世界の平均気温は年々上昇しており、最新のデータでは、100年あたり  $0.85^{\circ}\text{C}$  の割合で上昇している。その主要因とされている二酸化炭素も増加の一途をたどっており、脱炭素化への要求が高まっている。温室効果ガス排出を削減するためには、化石燃料の燃焼に依らない再生可能エネルギー等へのエネルギー生成方法の転換や、社会全体のエネルギー消費(伝送や変換における損失も含む)を低減する効率化が有効となる。そのために必要な技術としてパワーエレクトロニクスがある。パワーエレクトロニクスにおいて、重要な役割を担っているのがパワー半導体である。パワー半導体は、電流、電圧、周波数等を制御するスイッチング素子であり、スマートフォンやパソコン等の小容量分野から、EV/HEV、産業用ロボット、汎用インバータ、UPS等の中容量分野、電車、太陽光発電、風力発電等の大容量の分野で、電力制御に幅広く使用されている。パワー半導体に使用されているパワーデバイスは、年々小型化が進んできており、チップサイズは10年前と比較し1/2以下にまで小さくなっている。しかし、これまで主流であったSi(シリコン)を使用したパワーデバイスは、理論限界に近付いている。そこで、次世代材料であるSiC(炭化ケイ素)やGaN(窒化ガリウム)、 $\text{Ga}_2\text{O}_3$ (酸化ガリウム)といったWBG(ワイドバンドギャップ)半導体材料を使用したWBGデバイスの開発が進められている。WBGデバイスはSiに比べ、最大電界強度が一桁高く、バンドギャップが約3倍と広く、更にSiCは熱伝導率が高いとい

う特長をもつ。これらの特長から、WBG デバイスには高耐圧、低損失、高温動作、高周波数動作が期待されているが、そのためには、それぞれの WBG デバイスに適したパッケージ構造が必要となってくる。そこで本研究では、高耐圧、低損失、高温動作、高周波数動作等の WBG デバイスの特長を最大限に活かすことを可能とする、パワーモジュールのパッケージ構造の実現を最終目的とし、その特長の一つである高耐圧特性に着目し検討を行った。その結果、従来のような絶縁基板を厚くしたり沿面距離を延ばす等の設計方法から、絶縁破壊に影響を与える諸因子をコントロールし最適化することで、パッケージの大型化やコストアップを抑制することにつながる、幾つかの研究成果が得られたと考えている。以下、本研究の主要な成果を示す。

#### |(1)エポキシ樹脂封止材適用による沿面破壊抑制とメカニズム解明

同じ実験構成(絶縁基板)において、封止材をシリコーンゲルとエポキシ樹脂にした場合の絶縁破壊電圧試験を行い、絶縁破壊電圧が、エポキシ樹脂封止の方がシリコーンゲル封止より約 1.9 倍高いことが確認できた。この理由は、エポキシ樹脂の方がシリコーンゲルより、絶縁基板の銅箔およびセラミックとの密着状態が良く、ボイド・剥離等の未接合部が少ないため部分放電を起こしづらく、その結果、絶縁基板の外縁部にて沿面破壊しづらいためである。一般的に絶縁破壊の種類としては、絶縁材料自体のバルク破壊と絶縁材料表面で生じる沿面破壊があり、沿面破壊の方が低い電圧で生じるため、エポキシ樹脂による沿面破壊の抑制は、封止材のみを変えるだけでパッケージの絶縁破壊電圧を上げる、非常に有効な手段であることが明らかとなった。

#### (2)絶縁基板の表裏銅箔位置調整による三十点電界強度低減と絶縁破壊電圧向上

絶縁層に対する表銅箔と裏銅箔の位置を調整することで、銅箔、絶縁層、封止材からなる三重点の電界強度の大きさを制御できることを確認した。例えば AlN 基板の場合、表銅箔と裏銅箔の相対位置を同じにした場合と 3mm ずらした場合には、三重点の電界強度は 3mm ずらしたほうが約 20%増加する。また絶縁破壊電圧は、三重点の電界強度の大きさに連動して変化し、両者には相関関係があることが明らかとなった。例えば、三重点の電界強度が大きいほど、AlN は絶縁破壊しやすくなり、絶縁破壊電圧が小さくなる。表銅箔と裏銅箔の相対位置を同じにした場合と 3mm ずらした場合には、絶縁破壊電圧は 3 mm ずらした方が約 30%低下した。また、AlN の内部応力がほとんど無い理想条件の場合であるが、絶縁破壊箇所は、電界強度が高い三重点と一致しており、理想条件では三重点の電界強度低減が絶縁破壊電圧向上にダイレクトに結びつくことが明らかになった。

#### (3)常温と高温の絶縁破壊箇所の違いに対する破壊メカニズム解明

実際のパワーモジュールの絶縁破壊電圧試験において、絶縁破壊箇所が必ずしも三重点に

ならないことがあったが、この理由が AlN 内部の機械的応力であることが明らかになった。例えば、封止温度 100℃のエポキシ樹脂にて封止したパッケージ構成においては、サンプル 30℃にて、銅箔端部の位置における AlN 内部には引張応力が生じているが、それ以外の位置では圧縮応力が生じている。銅箔端部の三重点では電界強度も極大値を取るため、絶縁破壊箇所は、引張応力が生じており電界強度も高い、銅箔端部の近傍となる。一方、サンプル 200℃においては、銅箔端部によらず AlN 内部全体に引張応力が生じているため、絶縁破壊箇所は、銅箔端部の三重点近傍では無く、AlN 端部から 6~9 mm 離れた位置となった。そこに微小欠陥が存在し、それが起因となり絶縁破壊したと推定される。このように、三重点のような電界強度の極大値が存在していても、必ずしもその位置で破壊するとは限らず、表裏の銅箔に挟まれている絶縁層内部の応力成分に大きく依存することが明らかになった。

## 論文審査結果の要旨

WBG デバイスの特長を最大限利用できるようにするためには、パワー半導体のパッケージ技術の工法が日露である。本研究では、WBG デバイスの特長の 1 つである高耐圧特性に着目し、パッケージの高耐圧化に結びつく要素技術の研究を行った。

従来のパワー半導体、特に中・大容量帯のパワーモジュールの高耐圧化では、主要な絶縁部品である絶縁基板に対し、絶縁層のバルク破壊を抑制するために絶縁層を厚くしたり、絶縁層外縁部沿面破壊を抑制するために沿面距離を延ばすといった、一般的な対応を行ってきた。その結果、パッケージが大型化し、コストアップするという課題が生じてきた。そのような課題を解決するために、本研究では、絶縁破壊に影響を与える諸因子をコントロールし、それらを最適化することによってパッケージの大型化やコストアップの抑制を可能とすることを目的とし、従来の研究では明らかではなかった以下の項目について検討した。

(1)絶縁基板の絶縁破壊の種類としては、絶縁材料自体のバルク破壊と、絶縁材料表面で生じる沿面破壊の 2 種類があり、沿面破壊に対してはパッケージ封止材の影響が大きいと考えられている。本研究では、代表的な封止材であるシリコーンゲルとエポキシ樹脂をパラメータとした絶縁破壊電圧試験を行い、封止材が絶縁破壊の種類に及ぼす影響について調べた。

(2)熱伝導率が高く放熱性に優れ、かつ絶縁破壊電圧も高く高耐圧用の絶縁基板として期待されている窒化ケイ素基板と窒化アルミニウム基板に対し、同一形状の絶縁基板サンプルを用いて絶縁破壊電圧試験を行い比較した。

(3)電界強度が最大値となり、絶縁基板の絶縁破壊電圧に大きな影響を与えると考えられている、銅箔、絶縁層、封止材から成る三重点に対し、その位置と電界強度の大きさをパラメータとした絶縁破壊電圧試験と、それに対応した電界解析を行い、絶縁破壊箇所と電界強度、絶縁破壊電圧の関係を明らかにした。

(4)封止材により封止されたパッケージ形態を想定した絶縁基板に対し、温度をパラメータとした絶縁破壊電圧試験を行い、温度による絶縁破壊箇所の違い（三重点との関係）と絶縁基板内部応力の関係、および破壊に至るまでのメカニズムを明らかにした。

以下、各章で述べている成果と意義を記述する。

第1章では、本研究の背景、目的研究内容の概略を説明した。

第2章では、本研究内容に関連する基礎事項と、パワーモジュールの絶縁設計技術および高耐圧化への課題、パワーモジュールの主要な絶縁部品である絶縁基板の種類、製造方法および本研究に関連する従来研究事例について説明した。

第3章では、パワーモジュールの代表的な封止材であるシリコンゲルとエポキシ樹脂をパラメータとした絶縁破壊電圧試験結果について述べ、それを考察した。

第4章では、パワーモジュールの高耐圧用絶縁基板として期待されている窒化ケイ素基板と窒化アルミ基板の絶縁破壊電圧試験の結果とその理由を説明した。

第5章では、パワーモジュール絶縁基板の絶縁破壊に大きな影響を与えると考えられている、銅箔、絶縁層および封止材から成る三重点の電界強度に対するシミュレーションと実験結果について述べた。さらに絶縁層に対する表裏銅箔の位置を変えた場合の電界解析を行い、三重点を含めた電界強度分布を求め、その後、実験によって絶縁破壊電圧および絶縁破壊箇所を調査し、各々の相関を考察した。

第6章では、封止材により封止されたパワーモジュールのパッケージ形態を想定した絶縁基板に対し、温度をパラメータとして絶縁破壊電圧試験を行う、温度による絶縁破壊箇所の違い（三重点との関係）と絶縁基板内部応力の関係、および破壊に至るまでのメカニズムを考察した。

第7章は、本研究の成果を要約し、今後の課題について言及している。

本論文は現在利用されているパワーエレクトロニクスをどのようにパッケージングするか注目した内容であり、シミュレーションだけではなく破壊実験も含めた十分な検討を行っている。これらの内容は複合的な分野にまたがる研究であり、今後のパワーエレクトロニクスのさらなる進展に大きく貢献する。以上のことから、本論文は、博士論文の価値は十分にあるものと認められた。