

氏 名	脇本 博樹
博士の専攻分野の名称	博 士（工 学）
学 位 記 番 号	医工博甲第 4 7 0 号
学 位 授 与 年 月 日	令和 3 年 3 月 2 3 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	逆阻止型 IGBT の結晶欠陥解析と電気的特性に関する研究
論 文 審 査 委 員	主査 准教授 村 中 司 教授 矢 野 浩 司 准教授 白 木 一 郎 准教授 小 野 島 紀 夫 教授 鍋 谷 暢 一 山梨大学名誉教授 松 本 俊

学位論文内容の要旨

パワー半導体デバイスはエネルギー供給などの電力変換装置にはなくてはならない重要素子であり、その用途は拡大を続けている。近年では、省エネルギー化、高効率化、パリ協定などによる CO₂ 排出量抑制などの世界的なニーズを背景に、再生可能エネルギーをはじめ、ハイブリッド自動車や電気自動車など電動化車両の普及が進んでおり、これらを支えるパワーエレクトロニクス技術のキーデバイスとして、絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ(Insulated Gate Bipolar Transistor : IGBT)や金属/酸化膜/半導体電界効果トランジスタ (Metal/Oxide/Semiconductor Field Effect Transistor : MOSFET) に代表されるパワー半導体デバイスは大きな役割を果たしている。産業機器向けでは、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー分野や、インターネットデータセンターなどの無停電電源装置の分野などで成長が見込まれている。これらの需要の高まりにより、パワーエレクトロニクス機器、ならびに、パワー半導体デバイスの世界市場規模は、ますます拡大していくと予想される。今後、更なる利用拡大を目指すためには、パワーエレクトロニクス機器のさらなる高効率化が必要になる。最も効果的なアプローチとして、従来は 2 レベルが主流であった電力変換のマルチレベル化とパワー半導体デバイスの技術革新が挙げられる。本研究では、近年、高効率、低ノイズ電力変換装置として注目されている、アドバンスド T タイプ中性点クランプ型(Advanced T-type Neutral Point Clamped : AT-NPC) 3 レベル電力変換装置への適用するための逆阻止型 IGBT(Reverse Blocking IGBT: RB-IGBT)に着目して検討を行った。現行の RB-IGBT はシリコン半導体で作製されている。

近年は、SiC や GaN 等のワイドバンドギャップ半導体がパワー半導体デバイス分野で注目されているが、現状では、これらのワイドバンドギャップ半導体は、基板やデバイス製造コストがシリコンよりも圧倒的に高い。また、逆阻止型の IGBT もしくは MOSFET を実現するには、MOS ゲート構造の反対面(デバイス製造上、基本的には研磨された面になる)、および、チップ側壁(こちらでも機械的に切断された面になる)に漏れ電流が小さく、深いジャンクションを有する p/n 接合、もしくはショットキー接合が必須であるが、ワイドバンドギャップ半導体に関して言えば、現段階では技術的な難易度が高く、シリコンの RB-IGBT の方が優位性は高いと考えられる。

本論文は、次世代の高性能な RB-IGBT を実現することを目的として、以下の項目について着目し、まとめたものである。まず、従来の RB-IGBT は、逆バイアスを印加した時の漏れ電流(逆漏れ電流)が大きい問題があり、デバイスの動作温度が制限される問題があった。逆漏れ電流が大きい原因はシリコン半導体中の結晶欠陥に由来すると考えられるため、DLTS 法によるシリコンのエネルギーバンドギャップ中の深いエネルギー準位の観点から解析し、逆漏れ電流低減の手段を見出し、逆漏れ電流を低減させることである。次に、従来の RB-IGBT は、小・中容量のパワーエレクトロニクス製品向けに開発したものであり、回路インダクタンスが大きい製品に適用する場合、ターンオフ時のサージ電圧が定格電圧を超えてしまう可能性があった。この問題を克服するために従来の定格電圧を 600V から 700V へ上げるためのデバイス設計と、実際に作製したデバイスの測定結果から耐圧向上による損失低減効果を明らかにすることである。本論文は全 7 章からなり、その構成は以下の通りである。

第 1 章は序論であり、パワーエレクトロニクスとパワー半導体デバイスの概要と、パワー半導体デバイスに必要とされる電気特性に関する概要を説明したうえで、本研究の対象である RB-IGBT の特徴について述べている。

第 2 章では、通常の IGBT と共通であるセル構造と動作原理、および、通常の IGBT が主に適用される電力変換回路に関して説明したうえで、RB-IGBT が主に適用されるアドバンスド T-type NPC(AT-NPC) 3 レベル電力変換回路について述べている。

第 3 章では、次世代高性能 RB-IGBT を作製する上で課題となっている逆漏れ電流に関し、半導体物性の観点から漏れ電流の発生メカニズムと漏れ電流の構成成分、温度依存性に関して述べている。

第 4 章では、発生電流に大きな影響を及ぼす、結晶欠陥によってできるバンドギャップ中の深いエネルギー準位を解析するための Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS) 法の原理を述べている。

第 5 章では、従来の RB-IGBT と、逆漏れ電流を低減する目的で作製した改善品に関し、DLTS 法によるデータから、結晶欠陥によってできたバンドギャップ中の深いエネルギー準位の解析結果を述べている。

第 6 章では、計算により得られた温度依存性と漏れ電流の逆バイアス依存性に関し、実測値と DLTS 法による深い準位密度の解析結果を考慮して理論式から求めた逆漏れ電流の計算値とを比較、考察を行った結果を述べている。

最終章の第7章では本研究で得られた成果について総括し、今後の展望と課題に関して述べている。

論文審査結果の要旨

本論文は、近年、高効率、低ノイズ電力変換装置として注目されている、アドバンスド T タイプ中性点クランプ型(Advanced T-type Neutral Point Clamped : AT-NPC) 3 レベル電力変換装置に適用するための高性能な逆阻止型 IGBT(Reverse Blocking IGBT : RB-IGBT)を実現することを目的として、以下の項目について検討を行った成果をまとめたものである。

まず、従来の RB-IGBT は、逆バイアスを印加した時の漏れ電流（逆漏れ電流）が大きい問題があり、デバイスの動作温度が制限される問題があった。逆漏れ電流が大きい原因はシリコン半導体中の結晶欠陥に由来すると考えられるため、DLTS 法によるシリコンのエネルギーバンドギャップ中の深いエネルギー準位の観点から解析し、逆漏れ電流低減の手段を見出し、逆漏れ電流を低減させることである。次に、従来の RB-IGBT は、小・中容量のパワーエレクトロニクス製品向けに開発したものであり、回路インダクタンスが大きい製品に適用する場合、ターンオフ時のサージ電圧が定格電圧を超えてしまう可能性があった。この問題を克服するために従来の定格電圧を 600V から 700V へ上げるためのデバイス設計と、実際に作製したデバイスの測定結果から耐圧向上による損失低減効果を明らかにすることである。以下に、各章で述べてある内容と成果の意義を記述する。

第1章は序論であり、パワーエレクトロニクスとパワー半導体デバイスの概要と、パワー半導体デバイスに必要とされる電気特性に関する概要を説明したうえで、本研究の対象である RB-IGBT の特徴について述べている。

第2章では、通常の IGBT と共通であるセル構造と動作原理、および、通常の IGBT が主に適用される電力変換回路に関して説明したうえで、RB-IGBT が主に適用されるアドバンスド T-type NPC(AT-NPC) 3 レベル電力変換回路について述べている。RB-IGBT の構造および製造プロセス、通常の IGBT と比較して、RB-IGBT において最も特徴的な点である p 型分離領域形成技術についても詳細に説明されている。

第3章では、次世代高性能 RB-IGBT を作製する上で課題となっている逆漏れ電流に関し、半導体物性の観点から漏れ電流の発生メカニズムと漏れ電流の構成成分、温度依存性に関して述べている。漏れ電流発生メカニズムで最も重要となるのは、キャリアの再結合-発生過程である。一方、空乏層領域以外の電界がかかっていない領域（中性領域と呼ぶ）には強い電界が存在しないため、少数キャリアは拡散によって移動する。空乏層の n-ドリフト側の端で発生した正孔は拡散によって空乏層内に到達し、そこからは強い電界によって p+コレクタ側へ掃き出される。p+コレクタの中性領域で発生した電子は、拡散で n-ドリフト側へ移動し、空乏層へ到達すると n+エミッタ側へ掃き出される。この漏れ電流成分は拡散漏れ電流と呼ばれる。この章では、空乏層中で発生するキャリアによる発生電流と空乏層端で発生する少数キャリアによる

拡散電流に分けて、RB-IGBT の逆漏れ電流を説明する理論モデルを構築することに成功している。

第 4 章では、発生電流に大きな影響を及ぼす、結晶欠陥によってできるバンドギャップ中の深いエネルギー準位を解析するための Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS) 法の原理を述べている。DLTS 法において、複数の解析電圧で解析にすることにより、 $p-n$ 接合からの距離に対するトラップ準位密度の分布を明らかにする手法が示されている。また、パワーデバイスにおいて形成される結晶欠陥の起源および結晶欠陥がつくる準位をまとめて示している。

第 5 章では、従来の RB-IGBT と、逆漏れ電流を低減する目的で作製した改善 RB-IGBT に関し、DLTS 法によるデータから、結晶欠陥によってできたバンドギャップ中の深いエネルギー準位に関する理論考察の結果を述べている。DLTS 解析の結果から、炉アニール(FA)法で作製した従来の RB-IGBT ではバンドギャップ中心に近いエネルギー準位を持つトラップが高密度で存在しており、このトラップ準位が逆漏れ電流に大きな影響を与えていることを明らかにしている。また、他の漏れ電流の発生源として、 $p+$ コレクタ層における活性化されていない格子間ボロンが存在していることを実験的に明らかにしている。 $p+$ コレクタ活性化改善手法として、裏面コレクタ層の活性化を短時間で高温に熱処理できるレーザーアニール(LA)法が有効であることを示している。LA 法により活性化した $p+$ コレクタ活性化率は 54%の値が得られており、従来の RB-IGBT の活性化率 0.9%の値よりも大幅に改善することを実験的に示している。

第 6 章では、計算により得られた温度依存性と漏れ電流の逆バイアス依存性に関し、実測値と DLTS 法による深い準位密度の解析結果を考慮して理論式から求めた逆漏れ電流の計算値とを比較、考察を行った結果を述べている。FA 法で作製した従来 RB-IGBT では、高電圧領域での逆漏れ電流の実測値が理論値よりも大きいことを確認している。その原因は、 $p+$ コレクタ層中の不活性な格子間ボロンによる深い順による発生電流とであることを見出している。LA 法で作製した改善 RB-IGBT では、漏れ電流の理論値と実測値がよく一致することを示している。

最終章の第 7 章では本研究で得られた成果について総括している。上記の研究成果から得られた知見を基に $p+$ コレクタ層の活性化を FA 法から LA 法へ変更して作製した改善 RB-IGBT は、300V の逆漏れ電流を 1/5 に低減することに成功している。また、熱暴走温度を 136°Cから 181°Cへ 45°C改善することに成功している。

以上のように、本論文は次世代の高性能な RB-IGBT を実現することを目的として、特性改善の課題となっている逆漏れ電流に関し、結晶欠陥によってできたバンドギャップ中の深いエネルギー準位を解析する手法と電流発生機構を理論的に説明するモデルを新たに示したものである。その成果はパワーエレクトロニクスとパワー半導体デバイス分野に大きく貢献するものである。

以上により、審査委員は本論文の学術的および工学的価値は高く、博士（工学）に値するものであると判定した。