

京都大学	博士（工学）	氏 名	奥田 貴史
論文題目	Enhancement of Carrier Lifetimes in SiC and Fabrication of Bipolar Junction Transistors (SiC のキャリア寿命向上とバイポーラトランジスタの作製)		
(論文内容の要旨)			
本論文は、高耐圧・低損失パワー半導体デバイス用材料として有望な炭化珪素(SiC) におけるキャリア寿命の向上とバイポーラトランジスタの高性能化に関する基礎研究をまとめたものであり、6章からなる。 第1章では、電力変換機器で用いられるパワー半導体デバイスに要求される性能を紹介した後、SiC半導体の性質とSiCバイポーラトランジスタの研究開発の現状を述べている。現在、活発な開発が進められているSiCのMOS型電界効果トランジスタ(MOSFET)と対比させながら、SiCバイポーラトランジスタの有用性と研究課題を整理している。その後、SiCバイポーラトランジスタのオン抵抗や電流増幅率を支配するキャリア寿命と深い準位の重要性和研究の現状を概説し、当該分野における本研究の位置付けと目的を明らかにしている。 第2章では、SiC半導体におけるキャリア寿命の向上に取り組んだ成果を述べている。最近の研究により、n型SiCにおけるキャリア寿命制限欠陥(炭素空孔)の同定と低減が進展し、十分に長いキャリア寿命が達成されているが、p型SiCにおいては依然としてキャリア寿命が短いという課題があった。そこで、様々な熱処理がp型SiCのキャリア寿命に与える影響を系統的に調べ、p型SiCでは炭素空孔欠陥に加えて、水素で不活性化される欠陥がキャリア寿命を制限していることを明らかにした。高純度p型SiC厚膜成長層に高温熱酸化による炭素空孔低減処理と高温水素処理を施すことによって、従来の約5倍となる10 μsという長いキャリア寿命を達成した。また、バイポーラトランジスタへの応用を見据えて、キャリア寿命のドーピング密度依存性を初めて系統的に評価した。特にp型SiCに対しては、ドーピング密度によらず高温水素処理がキャリア寿命向上に有効であることを見出した。また、この水素処理による欠陥の不活性化の素過程を考察し、SiC表面から原子状水素が供給される過程が律速している可能性を指摘した。 第3章では、半導体の接合容量の過渡特性を解析する深い準位測定法(DLTS、MCTS)を適用することにより、n型およびp型SiCの禁制帯幅中に存在するほぼ全ての多数キャリアトラップと少数キャリアトラップを検出した結果を述べている。様々な熱処理を施した試料、デバイス作製時に用いる反応性イオンエッチングを施した試料について多数キャリアトラップと少数キャリアトラップを調べ、各々の処理による欠陥の生成と消滅を体系化した。特に、光照射を利用したMCTS法によってSiC半導体における少数キャリアトラップを系統的に調べたのは初めての成果であり、欠陥物理の観点で重要な学術的知見を得た。また、観測された主要なトラップの生成条件、熱的安定性や深さ方向分布を調べることによって、これらの欠陥の大半は不純物を含まない真性欠陥であり、炭素空孔関連欠陥と格子間炭素関連欠陥に分類できることを提案した。			

京都大学	博士（工学）	氏 名	奥田 貴史
第4章では、SiCバイポーラトランジスタの電流増幅率の向上を目指して、SiC表面におけるキャリア再結合を実験的に調べ、表面再結合を抑制する試みについて述べている。表面にSiO₂膜を形成した後にアルゴン、一酸化窒素、オキシ塩化リンを用いた処理を施すことによって、表面再結合の様子が大きく変化することを明らかにした。特にオキシ塩化リンによる処理を活用することで表面再結合を著しく低減でき、観測されるキャリア寿命が大きく改善されることを見出した。様々なプロセスで形成したSiO₂/SiC界面の欠陥密度をMOSキャパシタの容量－電圧特性から算出し、表面再結合と界面欠陥密度に明確な相関があることを示した。さらに、SiC結晶内の過剰キャリアの拡散と再結合を考慮した数値計算を行い、実験結果と照合することで、表面再結合速度の概算値を求めることに成功した。例えば、SiO₂膜を形成した直後の表面再結合速度は約20,000 cm/sと高いが、オキシ塩化リン処理によって約100 cm/sにまで低減できることを示した。 第5章では、上記で得られた知見を活用しながら、様々な構造を有するnpn型およびpnp型SiCバイポーラトランジスタを作製し、その電流増幅率、オン抵抗、耐圧を支配する要因を調べた結果について述べている。まず、n型厚膜コレクタを有するnpn型トランジスタにおいて、コレクタ接合にメサ構造と適切な接合終端構造を用いることにより、23 kVというトランジスタとして最も高い耐圧を達成した。第3章で得られた知見を元にn型コレクタ領域のキャリア寿命向上プロセスを採用することにより、SiCトランジスタでは初めて明確な伝導度変調効果を得ることに成功し、低いオン抵抗を達成した。また、ベース抵抗がトランジスタのオン抵抗に大きな影響を及ぼすことを指摘し、そのモデルが定量的に妥当であることを、回路シミュレーションを用いて実証した。次に、表面保護プロセスやエミッタおよびベース領域のドーピング密度を変化させたトランジスタの電流増幅率を調べることで、電流増幅率は主にエミッタ接合におけるキャリア注入率とベース表面におけるキャリア再結合が電流増幅率を制限していることを明らかにした。特に、メサ形に加工したエミッタ/ベース界面近傍の側壁におけるキャリア再結合を抑制することが、さらなる増幅率の向上に重要であることを指摘した。また、npn型トランジスタとの相補型動作を目指してpnp型バイポーラトランジスタを作製し、明瞭な動作を確認した。pnp型トランジスタでは、ベース抵抗が低いという利点があるものの、エミッタ接合におけるキャリア注入率が低いという課題があることを指摘した。 第6章は結論であり、本研究を通じて得られたn型およびp型SiCにおける深い準位の生成と消滅、特にp型SiCにおける顕著なキャリア寿命の向上、表面パッシベーションによる表面再結合の低減、バイポーラトランジスタの低オン抵抗化と高耐圧化などの成果を整理して述べている。また、当該分野における今後の研究課題を提示し、これらの課題解決に向けた研究指針を提案している。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、高耐圧・低損失パワー半導体デバイス用材料として有望な炭化珪素(SiC)におけるキャリア寿命の向上、深い準位および表面再結合の評価、バイポーラトランジスタの高性能化に関する基礎研究をまとめたものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

1. 熱酸化や高温熱処理を施したp型SiCのキャリア寿命を系統的に調べ、p型SiCでは炭素空孔欠陥に加えて、水素で不活性化される欠陥がキャリア寿命を制限していることを明らかにした。高純度SiC厚膜成長層に高温熱酸化による炭素空孔低減処理と高温水素処理を施すことによって、従来の約5倍となる10 μ sという長いキャリア寿命を得た。
2. SiCショットキー障壁の接合容量の過渡特性を解析することにより、n型およびp型SiCの禁制帯幅中に存在するほぼ全ての多数キャリアトラップと少数キャリアトラップを検出した。様々な熱処理を施した試料、デバイス作製時に用いる反応性イオンエッチングを施した試料について多数キャリアトラップと少数キャリアトラップを調べ、各々の処理による点欠陥の生成と消滅を体系化した。また、観測された主要なトラップの生成条件、熱的安定性や深さ方向分布を調べ、一部の欠陥については起源を提案した。
3. SiC表面におけるキャリア再結合を実験的に調べ、表面にSiO₂膜を形成した後にオキシ塩化リンを用いた処理を施すことによって、表面再結合を著しく低減できることを見出した。様々なプロセスで形成したSiO₂/SiC界面の欠陥密度を調べ、表面再結合と界面欠陥密度に明確な相関があることを示した。さらに、SiC結晶内の過剰キャリアの拡散と再結合を考慮した数値計算を行い、実験結果と照合することで表面再結合速度の概算値を求めることに成功した。
4. 上記で得られた知見を活用しながら、様々な構造を有するnnp型、pnp型SiCバイポーラトランジスタを作製し、その電流増幅率、オン抵抗、耐圧を支配する要因を調べた。n型厚膜コレクタを有するnnp型トランジスタにおいて、キャリア寿命向上プロセスを採用することにより、SiCでは初めて明確な伝導度変調効果を得た。また、適切な接合終端構造を用いることにより、20 kV以上の超高耐圧を達成した。

以上、要するに、本論文はSiC半導体におけるキャリア寿命とそれを制限する深い準位に関する系統的な評価、表面欠陥を介したキャリア再結合の解明を行い、これらの知見を集約してSiCにおけるキャリア寿命の向上とバイポーラトランジスタの顕著な高性能化を達成したもので、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成27年8月24日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。