

京都大学	博士（工学）	氏 名	川原 洸太郎
論文題目	Identification of Deep Levels in SiC and Their Elimination for Carrier Lifetime Enhancement (SiC中の深い準位の解析とキャリア寿命増大に向けた準位低減法の確立)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>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)を取り上げ、特にSiC結晶における深い準位とキャリア寿命に関する基礎研究をまとめたもので、9章からなる。</p> <p>第1章では、発送・配電系統など電力インフラにおける電力変換機器で用いられる高耐圧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バイポーラデバイス(PiNダイオード、サイリスタ、バイポーラトランジスタなど)の有用性について述べている。次に、SiCバイポーラデバイスの性能(オン特性とスイッチング特性)を支配するキャリア寿命と深い準位の重要性と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。</p> <p>第2章では、SiC結晶の作製と深い準位測定法(DLTS)の原理を述べた後、成長直後のn型およびp型SiC結晶に存在する深い準位の種類と密度について述べている。特に、SiCのキャリア寿命制限欠陥(ライフタイムキラー)となる$Z_{1/2}$センター($E_c - 0.67\text{eV}$)の性質や密度の成長条件依存性について整理している。</p> <p>第3章では、イオン注入やドライエッチングなどSiCデバイス作製時に用いる標準的なプロセスで生成されるSiC中の深い準位を調べた結果を述べている。いずれの研究においても、構造を工夫したn型およびp型SiC試料を準備することにより、SiCの広い禁制帯幅全域の深い準位を検出することに成功している。イオン注入試料では、N, P, Al, Neなど注入種によらず共通の深い準位が高密度で発生することから、これらは特定の不純物を含まない真性欠陥であることを明らかにしている。一方、ドライエッチングにおいても、イオン衝撃により表面近傍に高密度の深い準位が生成することを明らかにし、かつこれらの深い準位の大半が、イオン注入により生成される欠陥と同一であることを示している。</p> <p>第4章では、適切な熱酸化を施すことによって、3章で述べたデバイスプロセス(イオン注入、ドライエッチング)で生成されるほとんど全ての深い準位を桁違いに低減できることを見出し、その物理的機構について論じている。一方、この熱酸化処理により新たに生成される深い準位(HK0センター)については、その後の高温Arアニールにより消滅できることを明らかにしている。</p> <p>第5章では、熱酸化による深い準位低減プロセスのモデル化を試みた結果を述べている。熱酸化中に酸化膜/SiC界面から放出された過剰な格子間原子がSiCバルク結晶中に拡散し、結晶中の空孔を表面から消滅させるというモデルを構築し、拡散方程式を用いて数値計算を行って、SiC結晶中の欠陥分布を定量的に説明できることを示している。特に、数種類の実験結果を元に決定したパラメータ(格子間原子の拡散定数、格子間原子の生成率など)を</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	川原 洸太郎
<p>用いることで、任意のSiC結晶を任意の温度で任意の時間、熱酸化を施した後のZ_{1/2}センター密度の深さ方向分布をほぼ完全に予測できることを示した成果は特筆される。さらに、この結果を元にして、効率的にZ_{1/2}センターを消滅させる複数の手法を考案し、高温(1400°C)酸化が欠陥低減に最も有効であることを見出している。</p> <p>第6章では、SiCにおけるキャリア寿命制限欠陥である深い準位(Z_{1/2}センター)の起源に関する研究結果を述べている。同一試料に対して深い準位の測定(DLTS)と点欠陥の測定(電子スピン共鳴: EPR)を実施することを提案し、これを可能とするために必要な試料の条件を議論している。次に、様々なドナー密度やZ_{1/2}センター密度を有する厚い(100μm)SiCエピタキシャル成長層を作製し、DLTS測定によりZ_{1/2}センター密度、EPR測定により炭素空孔密度を測定したところ、測定した全ての試料において両者の密度がほぼ一致することから、Z_{1/2}センターの起源が孤立した炭素空孔のアクセプタ準位であることを明らかにしている。同時に、DLTSで観測されるEH7センター($E_C - 1.55\text{eV}$)が炭素空孔のドナー準位であることも解明している。</p> <p>第7章では、Z_{1/2}センターを消滅させる熱酸化プロセスによって、表面近傍に新たに生成される深い準位の種類と熱的安定性について調べ、その深さ方向分布を詳細に解析することで、これらの深い準位が熱酸化によって界面から放出された格子間原子がSiCバルク結晶に拡散する過程で生成した複合欠陥であることを提案している。同時に、SiおよびCイオン注入により生成する深い準位も調べ、これらの結果を総合することで、上述の深い準位の起源が、炭素の格子間原子のクラスターである可能性が高いことを示唆している。</p> <p>第8章では、SiC結晶のキャリア寿命を評価し、Z_{1/2}センター密度を意図的に増減させることによって、キャリア寿命を制御できることを示している。特に、1400°Cの長時間熱酸化を非常に厚い(220μm)SiCエピタキシャル成長層に適用することで、200μm以上の厚さに亘ってZ_{1/2}センターを消滅させることに成功し、33μsという最高のキャリア寿命を達成した成果は特筆される。また、過剰キャリアの拡散、再結合を考慮した数値解析により、Z_{1/2}センターを消滅させたSiC結晶における真のキャリア寿命は50μs程度であることを明らかにしている。</p> <p>第9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過程、主要な深い準位の熱的安定性と起源、キャリア寿命の制限要因の解析とZ_{1/2}センター消滅による大幅なキャリア寿命増大などの成果を整理している。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。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、高耐压・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)を取り上げ、特にSiC結晶における深い準位の生成と低減、深い準位の起源同定、およびキャリア寿命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. As-grown SiC、およびデバイス作製プロセスで生成されるSiC中の深い準位を系統的に調べ、イオン注入やドライエッチングプロセスでは高エネルギーイオン照射により、特定の不純物が関与しない真性欠陥に起因する深い準位が生成されることを明らかにした。さらに、適切な熱酸化およびその後のArアニールを施すことによって、ほとんど全ての欠陥の密度を桁違いに低減できることを見出した。
2. 熱酸化による深い準位低減プロセスを詳細に調べ、熱酸化時に酸化界面から放出される過剰な炭素原子が格子間原子となってSiCバルク結晶中を拡散し、結晶中の炭素空孔と結合することで炭素空孔関連欠陥が消滅することを明らかにした。この過程をモデル化することで、熱酸化後の炭素空孔関連欠陥の分布を精度よく予測することに成功した。さらに、この知見を元にして、効率的に欠陥を消滅させる複数の手法を提案した。
3. 同一試料に対して深い準位の測定(DLTS)と点欠陥の測定(電子スピン共鳴: EPR)を実施することで、SiCにおけるキャリア寿命制限欠陥である深い準位($Z_{1/2}$ センター)の起源が孤立した炭素空孔のアクセプタ準位であることを明らかにした。また、DLTSで観測される EH_7 センターが炭素空孔のドナー準位であることも解明した。さらに、この他の深い準位についても、詳細な実験および理論計算との比較を元に起源を提案した。
4. 高温での長時間熱酸化を非常に厚いSiCエピタキシャル成長層に適用することで、 $200\mu\text{m}$ 以上の厚さに亘って $Z_{1/2}$ センターを消滅させることに成功し、 $33\mu\text{s}$ という最高のキャリア寿命を得た。また、過剰キャリアの拡散、再結合を考慮した数値解析により、 $Z_{1/2}$ センターを消滅させたSiC結晶における真のキャリア寿命は $50\mu\text{s}$ 程度であることを明らかにした。

以上、要するに、本論文はn型およびp型SiCにおける深い準位の系統的な評価、各種のプロセスや処理による深い準位の生成と消滅過程の解析、深い準位の起源同定を行い、これらを総合して主要な深い準位の大幅な低減とキャリア寿命の顕著な増大を達成したもので、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25年2月22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。