

京都大学	博士（工学）	氏名	林 利彦
論文題目	高耐圧パワー半導体素子を目指したp型SiC結晶のキャリア寿命に関する研究		
<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p型SiC結晶におけるキャリア寿命の評価、解析に関する基礎研究をまとめたもので、7章からなる。</p> <p>第1章では、発送・配電システム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の重要性を述べ、SiCにおけるキャリア寿命に関する研究の現状を概説している。特に、p型SiCのキャリア寿命に関する研究がほとんど未着手であることを述べ、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、半導体中のキャリア寿命を制限する様々なキャリア再結合過程を整理し、これらの再結合過程の競合によりキャリア寿命が決まることを述べている。次に、様々なキャリア寿命評価方法の原理、およびその長所・短所を整理し、特に本研究で用いるマイクロ波検出光伝導度減衰法について詳述し、SiCを研究対象とする場合の注意点について述べている。</p> <p>第3章では、まず、高純度p型およびn型SiCエピタキシャル成長層（厚さ50μm）のキャリア寿命を測定した結果について述べている。光励起により生成するキャリア密度や試料温度を広い範囲で変化させたときのキャリア寿命の変化を調べ、n型、p型SiCそれぞれの場合について、キャリア寿命を制限する因子について論じている。第2章で述べた複数のキャリア再結合過程を考慮したモデル計算を試み、本研究で調べた範囲において、励起キャリア密度の低い場合は深い準位を介した再結合、励起キャリア密度が高い場合には表面/界面再結合が支配的であることを見出している。次に、Alドーピング密度の異なるp型SiCのキャリア寿命を評価し、アクセプタ密度の増大と共に、キャリア寿命が顕著に低下することを見出している。</p> <p>第4章では、まず、as-grownおよび様々な処理を施したSiCエピタキシャル成長層における深い準位を評価した結果を整理している。特に、n型SiCにおいて深い準位の低減とキャリア寿命増大に顕著な効果がある熱酸化処理およびその後の高温Arアニール処理によって、消滅あるいは生成する深い準位を明らかにしている。また、キャリア寿命制御に向けて、電子線照射により生成される深い準位およびその熱的安定性を調べた結果について述べている。次に、実際に深い準位低減プロセス（熱酸化および高温Arアニール）を50μm厚さの高純度n型およびp型SiCエピタキシャル成長層に適用し、n型SiCでは効果があるものの、</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	林 利彦
<p>p型SiCではほとんどキャリア寿命が改善されないことを述べている。そこで、表面再結合の影響を調べるために、様々な表面パッシベーション処理を試み、界面準位密度の少ない表面パッシベーション（堆積酸化膜にNOガスによる窒化処理を施す手法）を行うことで、p型SiC結晶の実効キャリア寿命（測定により得られるキャリア寿命）が1.5μsから2.6μsに増大することを見出している。また、光励起により生成された過剰キャリアの拡散や表面/界面再結合も考慮した数値計算を実施し、50μm厚さのSiCエピタキシャル成長層では、表面再結合および下地の基板における再結合の影響で、真のキャリア寿命を評価することが困難であることを指摘している。</p> <p>第5章では、前章で述べた下地の基板における再結合の影響を低減するために、非常に厚い(147μm) SiCエピタキシャル成長層を用いてキャリア寿命を評価した結果について述べている。この試料では、深い準位低減プロセス（熱酸化および高温Arアニール）の効果が明確に確認でき、表面パッシベーションを施さなくても実効キャリア寿命を0.9 μs (as-grown)から2.6 μsに向上できることを述べている。さらに、深い準位低減プロセスにより消滅する深い準位、および新たに生成する深い準位の分布を考慮して、SiC結晶内での過剰キャリア数の時間推移を数値計算により算出し、測定により得られた光伝導度減衰曲線とのフィッティングを行うことで、上記の深い準位低減後におけるp型SiC中の真のキャリア寿命が約9 μsであることを導出している。</p> <p>第6章では、低エネルギー電子線照射を用いて、炭素空孔関連欠陥を選択的に生成することにより、SiCにおけるキャリア寿命制御を試みた結果について述べている。欠陥低減プロセスを適用した厚膜SiCエピタキシャル成長層を用い、電子線照射量を調整することで、キャリア寿命を0.1~1.6 μsの範囲で制御できることを明らかにしている。最後に、本研究で得られた知見を総合して、p型SiCにおけるキャリア寿命制限欠陥について議論している。n型SiCでは、Z_{1/2}センター($E_C - 0.65\text{eV}$)がキャリア寿命制限欠陥（ライフタイムキラー）であることが知られている。p型SiCにおいても、Z_{1/2}センター密度が10¹³cm⁻³以上の場合は、n型SiCと同様にZ_{1/2}センターによりキャリア寿命が制限される。しかしながら、Z_{1/2}センター密度が低い場合には、Al原子を含む複合欠陥などのp型SiCにのみ存在する欠陥がキャリア寿命を制限していると推測している。</p> <p>第7章は結論であり、本研究を通じて得られたp型SiCにおけるキャリア寿命の励起強度および温度依存性、キャリア寿命の増大と制御、キャリア寿命制限因子の考察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p型SiC結晶におけるキャリア寿命の評価、解析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. p型およびn型SiCにおけるキャリア寿命の励起キャリア密度依存性や温度依存性を明らかにした。測定結果を過剰キャリアの拡散・再結合を考慮した数値計算結果と照らし合わせることにより、50 μm 程度の厚さを有する高品質SiCエピタキシャル成長層では、特に励起キャリア密度の高い条件において表面および下地の基板での再結合の影響を強く受けることを見出した。この結果を元に、様々な酸化膜で表面を保護することを試み、界面準位密度の低い酸化膜を適用することで、顕著な表面パッシベーションの効果を実証した。
2. 熱酸化、高温Arアニール、および電子線照射を施したn型およびp型SiC中の深い準位を系統的に調べ、これらの処理により生成する深い準位と消滅する深い準位を整理した。
3. 下地の基板での再結合の影響を低減するために、非常に厚い(147 μm)p型SiCエピタキシャル成長層を用い、さらに深い準位低減プロセス(熱酸化およびその後の高温Arアニール)を適用することで、実効キャリア寿命を0.9 μs (as-grown)から2.6 μs に向上した。また、深い準位の分布を考慮したモデルを用いた数値計算を駆使して、深い準位を低減したp型SiCにおける真のキャリア寿命が9 μs 程度であることを見出した。
4. 欠陥低減プロセスを適用した厚膜p型SiCエピタキシャル成長層を用い、電子線照射量を調整することで、キャリア寿命を0.1~1.6 μs の範囲で制御できることを明らかにした。次に、本研究で得られた知見を総合して、p型SiCにおけるキャリア寿命制限欠陥について議論した。n型SiCでは、 $Z_{1/2}$ センター($E_C - 0.65\text{eV}$)がキャリア寿命制限欠陥であることが知られているが、p型SiCにおいても、 $Z_{1/2}$ センター密度が 10^{13}cm^{-3} 以上の場合には、n型SiCと同様に $Z_{1/2}$ センターによりキャリア寿命が制限されることを示した。一方、 $Z_{1/2}$ センター密度が低い場合には、Al原子を含む複合欠陥などのp型SiCにのみ存在する欠陥がキャリア寿命を制限していることを提言した。

以上、要するに、本論文はp型SiCにおけるキャリア寿命の系統的な評価、キャリア寿命の向上と制御を行い、これらを総合してキャリア寿命制限因子について議論したもので、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。