

京都大学	博士 (工学)	氏 名	鐘ヶ江 一孝
論文題目	<p>Growth and Process-Induced Deep Levels in Wide Bandgap Semiconductor GaN and SiC (結晶成長及びプロセスにより導入されるワイドバンドギャップ半導体 GaN 及び SiC 中の深い準位)</p>		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、次世代の高電圧・低損失電力用パワーデバイス用半導体として有望なワイドバンドギャップ半導体の窒化ガリウム(GaN)および炭化珪素(SiC)中の深い準位の性質解明と制御を目指し、結晶成長時に導入されるGaN層中の深い準位およびデバイスプロセスによって導入されるSiC層中の深い準位の精密定量手法の開発、および深い準位の物性に関する研究についてまとめたもので、8章からなる。</p> <p>第1章では、電力変換機器で用いられる半導体パワーデバイスの重要性とパワーデバイスに要求される性能を紹介した後、GaNおよびSiC半導体の性質とこれら半導体パワーデバイスの有用性を述べている。次に、GaNおよびSiCパワーデバイスの研究開発および実用化の現状を整理し、さらなる高性能化と高信頼化のためには、結晶中の点欠陥や不純物が形成する深い準位の精密制御が重要であることを述べている。続いて、GaNおよびSiC結晶中の深い準位に関する先行研究をまとめ、深い準位の種類、物性、およびその起源に関する研究課題を述べて本研究の位置づけと目的を明確にしている。</p> <p>第2章では、本研究において深い準位の検出に用いる容量過渡分光法の基礎原理について述べている。pn接合やショットキー障壁の接合容量の過渡特性を半導体中の欠陥物理の観点で説明した後、温度を変化させながら過渡特性を解析するDLTS (Deep Level Transient Spectroscopy)法と、温度一定の条件で接合容量の過渡特性を数値解析するICTS (Isothermal Capacitance Transient Spectroscopy)法の原理を述べ、多数キャリアを捕獲する深い準位の検出に関する長所、短所を整理している。次に、少数キャリアを捕獲する深い準位の検出と精密解析が容易ではない理由を述べ、この問題を克服するための過去の試みについて紹介している。</p> <p>第3章では、GaN基板上のGaNエピ成長層で構成されるp+n接合を用いたn型GaN層中の正孔トラップH1の密度の定量手法について述べている。ここで、正孔トラップH1は、結晶成長時にn型GaN層中に導入される深い準位の中で、最も支配的に検出されるものである。正孔トラップH1の起源は必ずしも明らかではないが、この深い正孔トラップはGaNデバイスの耐圧維持層のドナーを補償し、低ドーピング密度制御を困難にする。このため、正孔トラップH1に関する詳細な研究は重要である。しかし、n型GaN層中で少数キャリアトラップである正孔トラップH1の評価は容易ではない。本研究では、GaN p+n接合を用いた電流注入法による少数キャリアトラップ密度の定量を試み、従来では考慮されていなかった (1) n型層中に注入された正孔密度分布と (2) 空乏層端部における正孔トラップを介した速いキャリア再結合の2つの効果によるトラップ密度の過小評価を補正する必要があることを提唱している。この2つの効果を適切に考慮することによって、GaN p+n接合ダイオードを用いてn型GaN中の正孔トラップH1の密度の精密定量に成功している。</p>			

京都大学	博士（工学）	氏 名	鐘ヶ江 一孝
<p>第4章では、pn接合の順バイアス印加による少数キャリア注入を使わずに少数キャリアトラップを精密に検出する手法を検討した結果について述べている。前章で述べたpn接合を用いた電流注入法では、n型GaNの上にp型層の成長と反応性イオンエッチングによるメサ構造の形成が必須となり、非破壊かつ簡便に評価することができない。この問題を解決するため、n型GaN結晶にショットキー電極を形成するだけで少数キャリアトラップを評価することを考え、バンドギャップよりエネルギーの小さい光(サブバンドギャップ光)を照射して少数キャリアである正孔を生成し、n型GaN中の正孔トラップを評価する手法を提案している。この手法においてn型GaN中の正孔トラップH1の密度を定量するには、サブバンドギャップ光照射中のトラップの正孔占有率を求める必要があることを指摘し、さらに任意の測定条件下において正孔占有率を計算するためには、当該トラップの正孔および電子の光イオン化断面積の比が重要であることを示している。そこで、同一のGaN p+n接合ダイオードに対して電流注入法、およびサブバンドギャップ光励起法の両方を適用して、トラップからの電子および正孔の光励起放出を実測し、このデータを欠陥物理に基づいて解析することによって、当該トラップの正孔および電子の光イオン化断面積の比を決定することに成功している。</p> <p>第5章では、n型GaNのショットキー障壁ダイオードを用いて、前章で提案したサブバンドギャップ光励起法によるn型GaN中の正孔トラップH1の密度定量を行った結果について述べている。当該トラップの正孔および電子の光イオン化断面積の比を用いることにより、サブバンドギャップ光照射下で得られた過渡容量特性を解析し、正孔トラップH1の密度を精度よく決定することに成功している。この解析の際にも、空乏層端近傍における電子および正孔の捕獲状況を精密に解析するなど、密度定量時の誤差を極力排除していることが特筆される。一方で、本手法は比較的長時間の過渡特性を繰り返し測定し、かつ温度スイープも必要であることから、計測時間が長くなるという欠点があることを指摘している。この問題を解決するために、波長の異なる二種類の光照射を活用することによって計測時間を桁違いに短縮し、短時間で容易に正孔トラップ密度を評価することにも成功している。</p> <p>第6章では、様々な条件で成長されたn型GaN試料を用いて正孔トラップH1を評価し、当該トラップの物性と起源について調べた結果を述べている。従来の研究により、正孔トラップH1の起源は、窒素サイトを置換した炭素であると推定されているが、当該トラップ密度を正確に定量することが難しいことから、直接的な根拠は希薄であった。そこで、前章で提案したショットキー障壁ダイオードを用いたn型GaN中の正孔トラップH1の密度の定量手法を用いて、様々な炭素密度を有するn型GaN中の正孔トラップH1の密度を定量し、炭素密度との比較を行っている。ここで、炭素密度は二次イオン質量分析法によって定量した。密度が$5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$から$5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$の広い範囲において、炭素密度と正孔トラップH1の密度が一致するという結果を得ており、ここからn型GaN中に混入したほぼ全ての炭素原子は窒素サイトを置換して正孔トラップとなることを初めて実験的に示している。</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏 名	鐘ヶ江 一孝
<p>第7章では、デバイス作製プロセスによってSiC中に導入される深い準位を評価した結果について述べている。デバイス作製プロセスによって生成される深い準位は、プロセスの種類(イオン注入、エッチング、酸化など)やその条件によって形成されうる欠陥の候補が多岐にわたり、またその密度が深さ方向分布を持つ。このため、プロセス起因の深い準位は評価が困難であり、その起源や生成メカニズムなどが明らかになっていないものが多い。本研究では、特に反応性イオンエッチングを施したSiC結晶の表面近傍に生成される深い準位の精密評価に取り組んでいる。容量過渡分光法から得られる深い準位の密度は、電圧印加により広がる空乏層における平均的な密度を示す。従来の方法では、測定原理上、深さ方向の空間分解能と検出される密度の感度にトレードオフの関係があり、急峻に変化する深さ方向分布を得ることは難しかった。本研究では、欠陥密度の深さ方向分布の関数形を仮定し、検出される平均的な密度の空乏層幅依存性を解析することで、上記のトレードオフを克服した深さ方向分布の抽出方法を提案している。実際に、提案した方法を用いて、SiC中の反応性イオンエッチング誘起欠陥密度の深さ方向分布を抽出し、炭素の格子間原子に関連する欠陥が表面近傍0.1~0.3 μmの領域に局在することを明らかにしている。</p> <p>第8章は結論であり、本研究において提案したワイドバンドギャップ半導体GaNおよびSiC中の深い準位の定量手法と、それらを用いて得られた深い準位の物性に関する学術的知見をまとめている。特に、少数キャリアトラップ密度の精密定量、および深さ方向に急峻に変化する密度分布を有する深い準位の検出に関する成果とその意義を整理している。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、窒化ガリウム (GaN) および炭化珪素 (SiC) パワーデバイスの高性能化を目指して、点欠陥や不純物に起因する深い準位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. GaNのpn接合に順バイアスを印加したときの少数キャリアの注入を活用することによって、n型GaN成長層における主要な正孔トラップ(H1センター)の検出を行った。n型層に注入された正孔分布と空乏層端のキャリア再結合の影響を厳密に考慮した解析を行って、当該正孔トラップの密度を精度よく定量することに成功した。
2. 作製が容易なn型GaNショットキー障壁を用いて、通常の測定では観測できない正孔トラップ(H1センター)を検出するために、禁制帯幅より低いエネルギーを有する光照射法を提案し、トラップ密度の定量に必要な光イオン化断面積を決定することに初めて成功した。
3. 上記の結果を活用して、n型GaNショットキー障壁の空乏層容量の光照射時の過渡変化を測定、解析することにより、正孔トラップ(H1センター)の密度を精度よく定量することに成功した。さらに、波長の異なる二種類の光照射を活用することによって計測時間を桁違いに短縮し、短時間で容易に正孔トラップ密度を評価することにも成功した。
4. 様々な条件で成長されたn型GaN成長層を用いて、提案した手法により正孔トラップ(H1センター)密度を求め、二次イオン質量分析により定量したGaN成長層中の炭素原子密度との相関を調べた結果、評価した全ての試料においてH1センター密度と炭素原子密度が一致していることから、H1センターの起源が窒素サイトを置換した炭素原子であることを見出した。
5. 反応性イオンエッチングを行った半導体中の深い準位は表面近傍に局在し、通常の評価では定量が困難であるが、バイアス電圧を変化させて測定したデータを解析することによって、反応性イオンエッチングを施したSiCの表面近傍に局在する深い準位密度の種類と密度の深さ方向分布を明らかにした。

以上、要するに、本論文は高電圧電力変換用デバイスとして有望なGaNおよびSiC結晶中の点欠陥や不純物に起因する深い準位の精密な評価手法を提案し、主要な深い準位の性質を明らかにしたもので、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、令和4年2月15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。