

京都大学	博士（工学）	氏名	渡辺 直樹
論文題目	Fundamental Study on Wide-Bandgap-Semiconductor MEMS and Photodetectors for Integrated Smart Sensors (高性能集積センサ実現に向けたワイドギャップ半導体 MEMS および光検出器の基礎研究)		
(論文内容の要旨) 本論文は、高温などの厳環境で動作する集積センサ応用を目指して、炭化珪素(SiC)や窒化ガリウム(GaN)等のワイドバンドギャップ半導体材料を用いたMEMS (Microelectro-Mechanical Systems)および光検出器に関する基礎研究をまとめたもので、6章からなる。 第1章では、現行のSi半導体の微細加工技術を駆使したMEMSの進展と課題について述べた後、SiCやGaN等のワイドギャップ半導体の性質とMEMS応用の研究状況を概説している。特に、厳環境におけるMEMS用材料として、熱的、化学的、機械的安定性を有するSiCやGaN等ワイドギャップ半導体の優位性を整理している。一方で、加工の困難さが災いして、SiCやGaN単結晶を用いたMEMSに関する研究が未開拓であることを述べ、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。 第2章では、可視域を含む広波長領域における波長可変フィルタの実現に向けて、SiC、GaN、窒化アルミニウム(AlN)の屈折率および熱光学係数を室温から500°Cの範囲で精密に測定した結果について述べている。独自の加工手法を用いて膜厚の均一なSiC、GaN、AlN単結晶メンブレン（薄膜）を作製することに成功し、精密な屈折率の測定を可能にしている。さらに、試料温度を500°Cの高温まで精密に制御できるチャンバーを自作し、紫外域から赤外域（250~1750nm）の範囲、および室温から500°Cの範囲において、屈折率を正確に決定している。次に、このデータを用いてSiC、GaN、AlNの熱光学係数を算出し、可視域ではGaNが波長可変フィルタ用材料として最も有望であることを見出している。また、本研究で得られた熱光学係数を用いて、GaN波長可変フィルタの光学シミュレーションを行い、その特性について論じている。 第3章では、高温動作SiC光検出器の設計に必要なSiCの光吸収係数の温度依存性を正確に測定した結果について述べている。まず、紫外光の透過スペクトルを室温から300°Cの温度範囲で測定可能な治具を自作し、これを用いてSiC単結晶の透過特性を精密に測定している。次に、得られたデータからSiC単結晶の光吸収係数の波長依存性および温度依存性を算出している。さらに、得られた光吸収係数の波長依存性および温度依存性が、禁制帯幅の温度変化およびフォノンとの相互作用を考慮した光吸収モデルで説明できることを定量的に解析している。第2、3章で得た結果は、当該分野における重要な物性データベースとなる。 第4章では、(光)電気化学エッチングを用いることでSiCの伝導型選択エッチングが可能であることを示し、これを活用してSiC単結晶から成るブリッジ構造、カンチレバー構造を作製し、特性を解析した結果について述べている。まず、SiC単結晶のp型/n型多層構			

京都大学	博士（工学）	氏名	渡辺 直樹
------	--------	----	-------

造に光電気化学エッチングを適用することで、**n型SiC**のみを選択的にエッチングできることを見出している。次に、多段イオン注入により**p型/n型多層構造**を形成し、光電気化学エッチングを適用することで、両端が支持された**SiCブリッジ構造**を作製することに成功している。この**SiCブリッジ構造**において良好な静電駆動を達成し、数値計算結果との合致点、相違点を議論している。さらに、電気化学エッチングを用いれば、**p型SiC**のみを選択的にエッチングできることを見出している。光電気化学エッチングと電気化学エッチングのエッチング機構を考察し、上述の伝導型選択性エッチングが生じる原因を論じている。次に、**n型/p型SiC多層構造**に電気化学エッチングを適用することで**カンチレバー（片持ち梁）構造**の作製に成功している。作製した**カンチレバー**の共振特性を測定し、同程度のサイズを有する**Siカンチレバー**に比べて桁違いに高い共振**Q値(230,000)**を達成している。これは、**SiC単結晶MEMS**の高いポテンシャルを実証する結果と言える。

第5章では、高温動作**SiC pn**フォトダイオードの作製と特性解析について述べている。まず、**p型/n型/n<sup>+</sup>型構造**を有するメサ形**SiC**フォトダイオードを作製し、良好な整流性と良好な光感度特性を確認している。次に、適切な逆バイアス電圧を印加することにより、特定の波長領域における光感度の温度依存性を無くすことができることを見出している。この理由について、フォトダイオード内のキャリアの生成、拡散、および再結合過程の空間分布およびその温度依存性を考察し、数値計算も駆使することで明らかにしている。また、フォトダイオードの高温におけるリーク電流の起源を詳細に調べ、メサ側壁における生成電流が支配的であることを見出している。そこで、メサ側壁のパッシベーション手法を改良することによってリーク電流を桁違いに低減させることに成功し、**500°C**という超高温において良好な光感度特性（量子効率**60~70%**）を達成している。

第6章は結論であり、本研究を通じて得られた**SiC、GaN、AlN**単結晶の光学物性およびその温度依存性、（光）電気化学エッチングを用いた**SiCブリッジ**および**カンチレバー構造**の作製、超高温動作**SiC**フォトダイオードの光感度特性等の成果を整理すると共に、**ワイドギャップ半導体MEMS**に関連する加工および設計技術の知見を要約している。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。

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、高温などの厳環境で動作する集積センサ応用を目指して、炭化珪素(SiC)や窒化ガリウム(GaN)等のワイドギャップ半導体材料を用いたMEMSおよび光検出器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. 独自の加工技術および高温物性評価技術を確立することにより、SiC、GaN、AlN単結晶の屈折率を広い波長範囲（紫外域から赤外域）および広い温度範囲で精密に測定し、熱光学係数の波長依存性を初めて決定した。次に、SiCの光吸収係数の波長依存性を室温から300°Cの広い温度範囲で精密に測定した。また、フォノンとの相互作用を考慮することによって、この光吸収係数の温度依存性を説明する物理モデルを構築した。これらの成果は、当該分野における重要な物性データベースとなる。
2. 光電気化学エッチングおよび電気化学エッチングを用いることにより、n型およびp型SiC単結晶のみを選択的にエッチングできることを実証し、その機構を説明する解釈を与えた。さらに、SiCエピタキシャル成長、イオン注入、ドライエッチング、熱酸化技術、および上記の（光）電気化学エッチング技術を駆使することにより、SiC単結晶から成るブリッジ構造で良好な静電駆動を達成し、カンチレバー構造では極めて高い共振Q値(230,000)を達成した。この共振Q値は、同程度のサイズを有するSiカンチレバーに比べて桁違いに高い値であり、SiC単結晶を用いたMEMSの高いポテンシャルを初めて実証した結果と言える。
3. メサ形SiCフォトダイオードを設計、作製し、良好な整流性と光感度特性を得た。適切な逆バイアス電圧を印加することによって、特定の波長領域の光感度が温度無依存になることを見出し、その物理的解釈を与えた。さらに、ダイオードのリーク電流がメサ側壁の生成電流に支配されていることを解明し、メサ側壁のパッシベーション手法を改良することによってリーク電流を桁違いに低減して、500°Cという超高温において良好なフォトダイオード動作を達成した。これは、半導体フォトダイオードとして最も高温における動作である。

以上、要するに、本論文は、SiCやGaNなどのワイドギャップ半導体単結晶を用いたMEMS実現に向けた基本的な加工技術を確立すると共に、超高温などの厳環境におけるMEMSや光センサの高いポテンシャルを初めて実証したもので、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1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。