

京都大学	博士 (工学)	氏 名	藤原 広和
論文題目	SiC の結晶欠陥がショットキー障壁ダイオード特性に及ぼす影響と特性改善に関する研究		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、SiC (炭化珪素) 半導体結晶中に存在する欠陥が電力用ショットキー障壁ダイオードの特性に与える影響の体系化に加えて、ダイオードの高性能化に関する基礎研究をまとめたもので、6章からなる。</p> <p>第1章では、ハイブリッド車等の電力変換器で用いられるパワー半導体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整理した後、SiC半導体の性質と高耐圧SiCユニポーラデバイス (ショットキー障壁ダイオード、電界効果トランジスタ) の有用性を述べている。特に、耐圧1 kV級で大電流駆動可能なデバイスの重要性と、これをSiC半導体で実現する際の困難さを整理している。次に、SiC結晶欠陥がデバイス特性に与える影響に関する現状の理解について概説し、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半導体デバイス作製時の活性層となるエピタキシャル成長層の形成技術に取り組み、高速成長の試みとSiC成長層中に存在する結晶欠陥の評価について述べている。高温における熱対流や反応炉内パーティクルの問題を大幅に低減できる独自の結晶成長装置を構築し、より高い温度で成長を可能とすることによって、当該分野の標準に比べて約5倍となる30 <math>\mu\text{m}/\text{h}</math>以上の速度で高純度かつ表面の平坦なSiC成長層を得ることに成功している。次に、このSiC成長層の純度、結晶性、結晶欠陥を多角的な手法により評価した結果を述べている。成長時のC/Si供給比を高く設定することにより、残留不純物密度が<math>1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}</math>という極めて高い純度を達成できること、エピタキシャル成長の初期に{0001}面の積層欠陥が発生しうることを見出している。また、SiC半導体デバイスに致命的な悪影響を及ぼす基板中のマイクロパイプ欠陥をエピタキシャル成長時に分解・閉塞させる技術を確立し、この転位変換メカニズムを転位論と結晶成長理論に基づいて議論している。</p> <p>第3章では、SiCデバイス作製で用いられる高温プロセスに適用できる耐熱性ショットキー障壁の形成について述べている。従来、n型SiCショットキー障壁には主にTiやNiが用いられてきたが、500°C以上の熱処理によってリーク電流が急増するなどの特性低下が問題になっていた。本研究ではMoを採用することによって、700°C以上の熱処理を施しても特性劣化のないショットキー障壁が得られることを見出している。作製したショットキー障壁ダイオードの理想因子、障壁高さ、リーク電流を詳細に調べ、Mo電極形成後に600~800°Cの熱処理を施すことによって特性がさらに改善し、理想的な障壁高さとうれた均一性を両立できることを示している。さらに、Mo/SiC界面構造をX線回折、断面電子顕微鏡観察、エネルギー分散型X線分析により評価し、熱処理による界面構造の変化と電気的特性の変化を対応付け、良好な特性を示す界面構造を提示している。</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	藤原 広和
<p>第4章では、SiC成長層中に存在する拡張欠陥が高耐圧(&gt;1kV)ショットキー障壁ダイオードの特性に及ぼす影響を系統的に調べた結果を述べている。まず、エピタキシャル成長時に生成された{0001}面の積層欠陥を1つでも含むダイオードは耐圧が約20%低下することを見出し、これが積層欠陥部における局所的な禁制帯幅の低下により解釈できることを述べている。次に、逆バイアス電圧印加時におけるリーク電流発生箇所をエミッション顕微鏡により同定し、貫通らせん転位、貫通刃状転位とダイオードのリーク電流の増大に相関があることを示している。これらのダイオードを丹念に調べると、貫通転位がSiC成長層表面に露出した箇所にナノスケールのピット（ナノピット）が形成されており、このナノピットの幾何学的形状の効果によって局所的な電界集中が生じることがダイオードのリーク電流増大に繋がることを見出している。そこで、作製プロセスを改善して、転位箇所にナノピットが形成されないダイオードを作製することによって、リーク電流が理想特性に近づくことを示している。すなわち、SiCでは真性キャリア密度が小さく、キャリア生成率が低いために貫通転位そのものが有意のリークパスとはならないこと、転位箇所にナノピットが形成された場合は、その箇所で幾何学的効果による電界集中が生じてリーク電流が増大することを初めて明確に示した点に意義が認められる。</p> <p>第5章では、SiC成長層表面のラフネスがショットキー障壁ダイオードの特性に及ぼす影響を調べた結果を述べている。前章で述べたように、貫通転位の箇所におけるナノピットの形成を抑制すれば、SiCショットキー障壁ダイオードのリーク電流は大幅に低減されるが、成長層表面に基板オフ角に由来するマクロステップが存在すると、やはり局所的な電界集中が発生してリーク電流の増大を引き起こすことを明らかにしている。そこで、化学機械研磨や触媒基準エッチングなどの表面処理を施してSiC表面を原子レベルで平坦化した後にショットキー障壁を形成することによって、ダイオードのリーク電流を顕著に低減できることを見出している。また、表面の平坦化は、リーク電流の低減だけでなく、ショットキー障壁高さや理想因子の均一性の向上にも有効であることを示し、これをSiC特有の電子物性の結晶面依存性と関連付けて議論している。最後に、上記の成果を集約して耐圧1.2 kV、電流200 A級のSiCショットキー障壁ダイオードを再現性良く作製することに成功している。</p> <p>第6章は結論であり、本研究を通じて得られたSiC半導体結晶の高速エピタキシャル成長と欠陥評価、Moを用いた耐熱性ショットキー障壁の形成、積層欠陥や転位など様々な拡張欠陥がSiCダイオード特性に与える影響の明確化を行い、これらの知見を集約して高耐圧・大電流SiCショットキー障壁ダイオードを実現した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。</p>			

氏名	藤原 広和
----	-------

(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)半導体結晶中に存在する欠陥が高耐圧(>1kV)ショットキー障壁ダイオードの特性に与える影響の体系化と、ダイオード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. SiC半導体デバイスの活性層のエピタキシャル成長に取り組み、独自の結晶成長装置を構築し、従来より高い温度で成長を可能とすることによって、当該分野の標準に比べて約5倍となる30  $\mu\text{m/h}$ 以上の速度で高純度かつ表面の平坦なSiC成長層を得ることに成功した。次に、このSiC成長層の結晶欠陥を詳細に評価し、エピタキシャル成長の初期に{0001}面の積層欠陥が発生しうることを見出した。
2. 高温プロセスに適用できる耐熱性ショットキー障壁の形成に取り組み、従来用いられてきたTiやNiに代わって、Moを採用することによって、700°C以上の熱処理を施しても特性劣化のないショットキー障壁が得られることを見出した。また、600~800°Cの熱処理を施すことによって、所望の障壁高さ均一性を両立できることを示し、Mo/SiC界面構造との相関を明らかにした。
3. SiC成長層中に存在する拡張欠陥が高耐圧ショットキー障壁ダイオードの特性に及ぼす影響を系統的に調べ、エピタキシャル成長時に生成された{0001}面の積層欠陥を1つでも含むダイオードは耐圧が約20%低下することを明らかにした。また、貫通転位とダイオードのリーク電流の増大に相関があることを示した上で、丹念に調べると、これらの貫通転位がSiC成長層表面に露出した箇所にナノスケールのピットが形成されており、このナノピットの幾何学的形状の効果によって局所的な電界集中が生じることがリーク電流の増大に繋がることを見出している。すなわち、貫通転位に起因するナノピットがリーク電流の起源であり、転位そのものが有意のリークパスとはならないことを初めて明確に示した。
4. SiC成長層表面のラフネスがショットキー障壁ダイオードの特性に及ぼす影響を調べ、成長層表面に基板のオフ角に由来するマクロステップが存在すると、局所的な電界集中が発生してリーク電流の増大を引き起こすことを明らかにした。また、研磨加工によりSiC表面を原子レベルで平坦化することによって、リーク電流を顕著に低減できることを見出した。

以上、要するに、本論文はSiC半導体結晶の高速エピタキシャル成長の達成、耐熱性ショットキー障壁の形成、様々な拡張欠陥がSiCダイオード特性に与える影響の明確化を行い、これらの知見を集約して高耐圧・大電流SiCショットキー障壁ダイオードを実現したもので、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29年1月13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。

氏 名

藤原 広和

(論文審査の結果の要旨)

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。