

称号及び氏名 博士（工学） 上田 康博

学位授与の日付 平成 21 年 3 月 31 日

論文名 「ワイドバンドギャップ半導体デバイスの高性能化に関する研究」

論文審査委員 主査 内藤 裕義

副査 秋田 成司

副査 藤村 紀文

副査 中山 喜萬

論文要旨

20 世紀後半から現在まで、半導体を核とするエレクトロニクスデバイス（トランジスタ、集積回路、マイクロプロセッサ、光デバイス）は社会を大きく変革してきた。21 世紀のいま、情報・通信技術を支えるコンピュータ、ネットワークの進展は世界的な趨勢となったが、一方で社会は、克服しなければならないエネルギー、環境など大きな問題を抱えている。今求められることはエネルギー利用の効率化である。特に、電気エネルギーの高効率利用は、きわめて重要である。電力の輸送や変換はもちろん、家電機器、照明、空調、自動車、列車、産業用機器、各種電源などの各種電気・電子装置における電力消費過程において、数多くの半導体パワーデバイスが使用されている。これらパワーデバイスの低損失化、高性能化は電力利用の大幅削減に直接結びつき、その波及効果は極めて大きい。現在、インバータを始めとするパワーデバイスは、すべて Si 半導体で作製されているが、いまや、Si の物性に起因する性能限界に近づき、今後飛躍的な発展は期待できない。また、Si デバイスを用いた電子制御回路の動作温度は、最大 150 °C であるが、航空機、自動車、発電、金属精錬、宇宙開発などの分野では、常温以上の温度範囲で物理量の制御を行う必要が高まっており、Si デバイスの動作限界温度を越える 200 °C 以上の高温で動作するデバイスが求められる。ガスタービンエンジン・発電機の燃焼制御は、CO₂削減に代表される地球規模の環境問題に繋がり、その解決には新たな半導体デバイスが必要である。

SiC（炭化ケイ素）や GaN（窒化ガリウム）といったワイドバンドギャップ半導体では、Si 半導体の物性値の限界を超える低電力損失、高速スイッチ、高温動作が期待できる。SiC は 3.0~3.2 eV、

GaN も 3.3 eV 程度のバンドギャップを有し、理論的には 800 °C 以上の温度でもデバイス動作は可能である。SiC は GaN に比べ、高温での材料の安定さという点で優れている。仮に表面が酸化されてもデバイス特性の変化は小さいと考えられる。小型、低損失、高効率で、冷却が簡易化できるので、SiC デバイスの将来が大いに期待される。

このような SiC デバイスが、今後パワーデバイス、高温デバイスの分野に入っていけば、電気エネルギーの有効利用が大きく期待できる。そのエネルギーはわが国において数百万 kW に達するとの試算もある。新規発電所の開発がなくなれば、環境への負荷が小さくなり地球温暖化防止に貢献する。

本研究は、上記に概説したワイドバンドギャップ SiC 半導体を用いたデバイスの高性能化に繋がる、結晶成長技術、各種デバイス作製技術の開発と向上に関するものである。

本研究の第 1 の目的は、短波長発光デバイスとしての SiC 青色 LED (発光ダイオード) の高輝度化・高信頼性化と、青紫色 LED への短波長化である。LED の高輝度化を図れば、同一の明るさを得るために必要な動作電流の低減が可能であり、即ち低消費電力化に繋がる。高輝度化へのアプローチとしてのデバイス発光効率向上のためには、結晶成長技術、発光中心を含む不純物制御技術、デバイス構造などの向上および最適化などが求められるが、本研究では、SiC の液相エピタキシャル成長における結晶性の高品質化と不純物ドーピングについて検討を行い、SiC 青色 LED の高効率化技術を明らかにする。また、上記の高効率化技術を応用し、さらに短波長の青紫色 LED の試作とその特性に関する評価検討を行う。

本研究の第 2 の目的は、これまでの最高レベルの高温で動作し、かつ実用可能なデバイスとして SiC MESFET (金属半導体電界効果型トランジスタ) および UV (紫外) 光センサの高性能化を図ることと、今後が開発が必要とされる技術や課題を明らかにすることである。燃焼制御システムに用いられるデバイスには、火炎から放射される光スペクトル中の微弱な紫外光を検知する UV センサと、その信号を増幅する FET などの能動デバイスが必要とされる。火炎はその燃焼状態に応じ、複数のラジカルに起因するスペクトルを発するが、その信号強度をフィードバックさせることにより、燃焼効率を最適に制御することが可能である。しかし上記のデバイスは、高温環境下で動作することが求められる。高温デバイスとして要求される種々の目標仕様について SiC 半導体材料の高温での物性的な検討、デバイス作製の要素技術開発、デバイス作製と評価に関する成果を本論文にまとめた。

本論文は 6 章からなり、第 1 章の序論では今の時代が求める技術を実現するためのワイドバンドギャップ半導体デバイス開発の必要性を述べ、本研究に至った背景と半導体 SiC デバイス開発の目的とその重要性を述べた。

第 2 章では、ワイドバンドギャップ半導体材料である SiC について物性の基本的特徴を概説し、SiC デバイスの優位性と課題を示した。さらに、SiC デバイス作製のための要素技術として、結晶成長技術、不純物制御技術、電極形成技術、加工技術の現状を示すとともに、本研究のために開発した技術内容を明らかにした。SiC 単結晶インゴットの成長技術として、改良レーリー法をさらに発展させた真空昇華法において、表面成長律速および原料供給律速を呈する圧力、温度、温度勾配などの成長条件を明確にした。育成結晶のポリタイプ制御に関し、6H-SiC 種結晶の面極性 (Si 面と C 面) および成長時温度が大きな影響を与えることを明確にし、4H-SiC 結晶を育成するためには、種結晶に C 面を用いると共に 2300 °C 以上の基板温度によって育成できることが分かった。そして、その特長を活かした SiC デバイスとして、短波長発光デバイス、受光デバイス、高温動作デバイスについて概説をし

た。

第3章では、SiCを用いた短波長発光デバイスとして、6H-SiCを用いた青色LEDの発光効率向上と特性の均一性ならびに寿命の向上に大きく寄与する結晶育成について述べた。エピタキシャル層の結晶性の高品質化の技術に関し、オフ基板結晶と結晶成長条件などについて検討を行った。さらに、p形層の結晶成長温度に着目し、n形層に比べ低温で成長させることにより、p形層の結晶品質と注入効率の向上を図ることができることを明確にした。以上によりSiC青色LEDの光度を約10倍向上し、省電力化を実現した。また、さらなる短波長の青紫色発光ダイオードを製作するために開発した、ポリタイプの異なる4H-SiC単結晶を基板に用いてエピタキシャル成長を行い作製した青紫色LEDの特性評価結果について示した。

第4章では、高温動作可能なSiC MESFETの作製方法と動作温度性能向上に向けた研究について述べた。高温に耐えるゲート用電極の形成についてAuおよびPtショットキー障壁の特性評価を行い、800℃にいたるショットキーダイオード特性の変化と、SiC中への金属の拡散状態を調べた結果、Auでは900℃、Ptでは700℃までの高温に対しショットキー特性を保つことが確認できた。6H-SiCおよび4H-SiCを用いたデバイス特性について、室温と高温での特性の評価結果を比較、解析し、高温におけるMESFETの特性の物性的な裏付けを明らかにした。Auゲート6H-SiC MESFETでは最高動作温度400℃を、さらにPtゲート4H-SiC MESFETでは、最高560℃の動作温度を確認した。この動作温度は、世界最高レベルである。この4H-SiC MESFETの高温における信頼性については、400℃でのドレイン電流の経時変化を測定した結果、200時間までの範囲で特段の劣化が観察されないことを示した。

第5章では、6H-SiCを用いた高温動作が可能なUVセンサの作製と、評価結果について示し、高温における特性に関して考察を行った。受光面から深さ0.1μm程度のごく浅い接合を形成するため、6H-SiCへのN⁺イオン注入により作製したダイオードのI-V特性を検討し、注入条件との関係を調べた結果、注入エネルギー60 keV、注入量 5×10^{14} cm⁻²近傍、注入温度800℃が最適であることを明らかにした。作製したUVセンサにおいて、室温での最高感度のピーク波長と感度は、それぞれ290 nmと58.6 mA/Wであり、炎からのOHラジカルの波長308 nmに対する感度は47 mA/Wであることを明らかにした。逆方向印加電圧-10 Vでの暗電流は、11 nA/cm²であった。光電流のダイナミックレンジは、10 nA~1 mAの4桁以上の範囲であった。UVセンサの温度変化に伴う光電流の増加について考察を行い、主にSiCの吸収係数及び拡散長の増加が原因であると推定した。光電流の温度係数は、波長250 nmから300 nmに対し0.5%以内に収まっており、また400 nmまでの範囲においても1%以内であり、比較的溫度補正が容易な係数であった。UVセンサの最高動作温度700℃を確認した。光電流の分光特性については、500℃までの温度依存性を調べ明確にした。

第6章では、本研究で得られた主要な成果を総括し結論をまとめ、将来展望を示した。

審査結果の要旨

本論文は、青色発光、高温動作するSiCワイドバンドギャップ半導体デバイスの高性能化に関する研究をまとめたものであり、次のような成果を得ている。

(1) SiC 単結晶インゴットの成長技術として、改良レーリー法をさらに発展させた真空昇華法において、表面成長律速および原料供給律速を呈する圧力、温度、温度勾配などの成長条件を明確にした。育成結晶のポリタイプ制御に関し、6H-SiC 種結晶の面極性 (Si 面と C 面) および成長時温度が大きな影響を与えることを明確にし、4H-SiC 結晶を育成するためには、種結晶に C 面を用いると共に 2300 °C 以上の基板温度によって育成できることを示した。

(2) SiC を用いた短波長発光デバイスとして、6H-SiC を用いた青色発光ダイオード (LED) の発光効率向上と特性の均一性ならびに寿命の向上に大きく寄与する結晶育成法を示した。エピタキシャル層結晶性の高品質化により、SiC 青色 LED の光度を約 10 倍向上し、省電力化を実現した。また、さらなる短波長の LED を製作するため、ポリタイプの異なる 4H-SiC 単結晶を基板に用いてエピタキシャル成長を行い、青紫色 LED の動作を実証した。

(3) 高温動作可能な SiC 金属半導体電界効果トランジスタ (MESFET) の作製方法と動作温度性能向上を実証した。高温に耐えるゲート用金属電極として、Au では 900 °C、Pt では 700 °C までの高温に対しショットキー特性を保つことが確認できた。Au ゲート 6H-SiC MESFET では最高動作温度 400 °C を、Pt ゲート 4H-SiC MESFET では、560 °C の動作温度を確認した。また、この 4H-SiC MESFET の高温における信頼性も示した。

(4) 6H-SiC を用いた高温動作が可能な UV センサの作製と、評価結果について示し、高温動作を実証した。作製した UV センサにおいて、室温での最高感度のピーク波長と感度は、それぞれ 290 nm と 58.6 mA/W であり、炎からの OH ラジカルの波長 308 nm に対する感度は 47 mA/W であることを明らかにした。光電流のダイナミックレンジは、10 nA~1 mA の 4 桁以上の範囲であった。UV センサの最高動作温度 700 °C を確認した。

以上の諸成果は、SiC ワイドバンドギャップ半導体の製作手法を確立し、青色、青紫色 LED、高温動作する MESFET、UV センサの高性能化を実現したもので、電子物理工学分野に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うことに必要な能力と学識を有することを証したものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査ならびに最終試験の結果から、博士 (工学) の学位を授与することを適当と認める。