

界面ナノ構造制御による ワイドギャップ半導体の機能融合とパワーデバイスへの展開

須田 淳

京都大学大学院工学研究科電子工学専攻

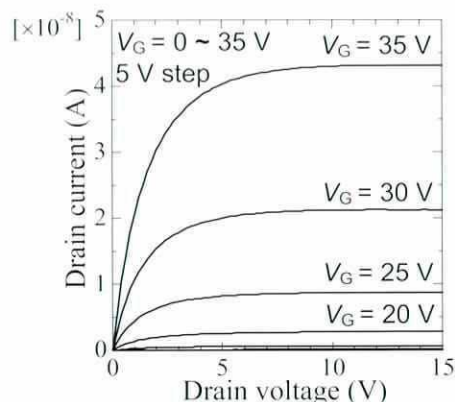
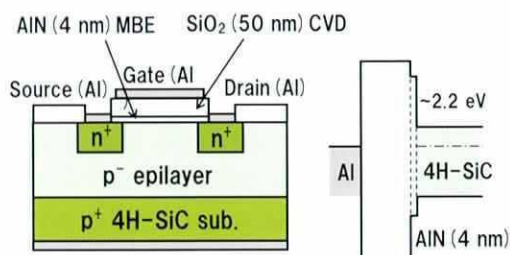
1. 研究のねらい

広禁制帯幅(ワイドギャップ)半導体のシリコンカーバイド(SiC)、Ⅲ族窒化物(Ⅲ-N)は、大きな絶縁破壊電界や高い飽和電子ドリフト速度などの優れた物性を持つことから、次世代電子デバイス材料として大きな期待が寄せられている。これまで、これら2つの材料は別個に研究が進められてきた。それぞれの材料で大きく進展した技術がある一方、解決困難な技術課題もある。もしここで、これら2つのワイドギャップ半導体を機能的に融合することができれば、それぞれの長所を活かし、短所を補い合うことができ、その結果、単独材料では不可能な、より高い性能、高度な機能を持ったデバイスの実現が期待できる。このようなデバイスにおいては、Ⅲ-N/SiC 界面がデバイス動作の本質を担っており、デバイスに適した界面電子物性を実現できるかどうか、デバイス開発成功の鍵となる。Ⅲ-N と SiC との間には、結晶構造(ポリタイプ)の違い、化学結合(Ⅲ-V/Ⅳ-Ⅳ)の違いという困難さがあり、高品質ヘテロエピタキシャル成長や、界面電子物性制御が難しく、上述のデバイスの成功には至っていない。本研究では、Ⅲ-N/SiC ワイドギャップ半導体の界面のナノスケール制御により、これらの問題を克服し、高性能デバイスを実現することを目指した。ヘテロ界面の形成には、その場観察や、原子レベルの制御性に優れた分子線エピタキシーを用いた。デバイスとしては超低損失電力用パワーデバイスへの応用が期待される AlN/SiC MISFET、高効率無線通信用パワーデバイスへ応用が期待される GaN/SiC HBT を対象に研究を進めた。

2. 研究成果の概要

AlN/SiC 電界効果トランジスタ(MISFET)

MISFET 実現のためには、界面制御と同時に高品質 AlN を成長することが必須となる。まず最初に、高品質 AlN を実現すべく、ポリタイプの違いの克服に取り組んだ。ガスエッチングによるマイクロステップバンチング現象を利用して 4H-SiC のステップ高さを 4 分子層(1.0nm)に制御した SiC 基板を準備し、表面清浄化や成長シーケンスの工夫により、SiC 上へウルツ鉱構造 2H-AlN を成長初期から layer-by-layer 成長させることに成功した。ステップ高さ制御と layer-by-layer 成長の相乗効果により、ゲート絶縁膜として十分な絶縁性を持つ、高品質 AlN のヘテロエピタキシャル成長に成功した。次に、界面電子物



性の制御に取り組んだ。金属/AlN/4H-SiC MIS ダイオードを作製し、界面準位密度を高周波 C-V 測定により評価した。AlN/SiC 界面における、Si-N 結合/C-Al 結合比の制御を目的とし、AlN 成長開始時の窒素先行照射の効果調べた。先行照射なしでは界面準位密度は $4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ であったが、先行照射ありでは $7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ と界面準位密度を 1/5 に低減することに成功した。上記の技術を持って、AlN/SiC MISFET の試作を行った。ゲート電極に、より高電圧が印加可能な構造として、 SiO_2/AlN スタック構造を考案した。作製した MISFET の構造および動作特性を図に示す。良好なトランジスタ動作が確認された。過去に報告された AlN/SiC MISFET で、このように線形領域、飽和領域が明瞭に観察されたものはなく、本研究がはじめてである。

GaN/SiC ヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBT)

AlN/SiC における知見を最大限活用し、SiC 上への GaN の結晶成長を確立した。次に、GaN 層の電子注入層としての機能を確認するために、n-GaN/p-SiC ヘテロダイオードを作製し、エレクトロルミネッセンスの測定を行った。SiC 層に由来する青色の発光が観察され、この結果より n-GaN から p-SiC への電子注入、つまり HBT に必要な界面機能が発現していることが確認された。この成長技術を用いて GaN/SiC HBT を試作し、バイポーラトランジスタ動作を確認した。

新規面方位の利用によるポリタイプ整合 III-N/SiC 界面

ポリタイプの違いを克服するまったく別のアプローチとして、結晶の積層構造が表面に現れた SiC 無極性面を用いて、成長させる III-N のポリタイプを SiC と同一化させる方法を考えた。6H-SiC(11-20)と 4H-SiC(11-20)基板上へ AlN の成長を試みた。6H-SiC 上の AlN は通常の 2H 構造になってしまったが、4H-SiC 上の AlN は、4H 構造を持つことが判明した。4H ポリタイプを持つ AlN は過去に報告はなく、世界初である。しかも、X 線回折、TEM 観察より、この 4H-AlN は、ヘテロエピタキシャル成長 AlN としてトップレベルの結晶性を持つことが明らかになった。今後は AlN/SiC デバイスへの応用、新規な 4H-AlN の基礎物性解明へと展開する予定である。

3. 主な論文

1. N. Onojima, J. Suda and H. Matsunami, High-quality AlN by initial layer-by-layer growth on surface-controlled 4H-SiC (0001) substrate, *Jpn. J. Appl. Phys.* **42**, L445, 2003.
2. N. Onojima, J. Suda and H. Matsunami, Impact of SiC surface control on initial growth mode and crystalline quality of AlN grown by molecular-beam epitaxy, *physica status solidi (c)* **0**, 2529, 2003.
3. N. Onojima, J. Suda, T. Kimoto, H. Matsunami, 4H-polytype AlN grown on 4H-SiC (11-20) substrate by polytype replication, *Appl. Phys. Lett.* **83**, 5208, 2003.
4. N. Onojima, J. Kaido, J. Suda, T. Kimoto, Molecular-beam epitaxy of AlN on off-oriented SiC and demonstration of MISFET using AlN/SiC interface, *physica status solidi (c)* **2**, 2643, 2005.
5. Y. Nakano, J. Suda, T. Kimoto, Direct growth of GaN on off-oriented SiC(0001) by molecular-beam epitaxy for GaN/SiC heterojunction bipolar transistor, *physica status solidi (c)* **2**, 2208, 2005.
6. R. Armitage, J. Suda, T. Kimoto, Epitaxy of nonpolar AlN on 4H-SiC (1-100) Substrates, *Appl. Phys. Lett.* **88**, 011908, 2005.

4. その他

特許 PCT 公開番号 WO2004/084283 半導体結晶成長方法 須田淳、松波弘之、小野島紀夫
PCT 公開番号 WO2005/010974 電界効果トランジスタ及びその製造方法 須田淳、松波弘之
他に出願中 1 件

受賞 第 33 回結晶成長国内会議講演奨励賞, (日本結晶成長学会, 2003/11/20)