

## 論文内容の要旨

博士論文題目 塩素ガス熱エッチング法を用いた 4H 型炭化ケイ素の微細加工と  
それを活用した超低損失電力制御素子への応用

氏名 織瀬 英典

### (論文内容の要旨)

ワイドバンドギャップ半導体材料の 4H 型炭化ケイ素(4H-SiC)は、超低損失電力制御素子材料として強く期待されている。高性能な素子構造実現には表面に微細加工が求められる。SiC は化学的に安定であり、一般的に物理的処理であるプラズマ加工法が用いられるが、プラズマ損傷やマスク材が課題である。そこで、本研究では化学的加工法である高温塩素ガス熱エッチング法で SiC の微細加工を試みた。シリコン酸化膜を加工マスクに熱エッチングすると、その側壁には結晶損傷のない傾斜面が形成される。しかし、SiC の異方性や傾斜面形成機構は明らかでなく、さらに傾斜面が超低損失電子素子に用いることが出来るか不明である。そこで、本研究では i)4H-SiC を熱エッチングして得られる傾斜面形成機構の解明、ii)超低損失電力制御素子への適用、iii)熱エッチングを用いた従来のプラズマ加工法の課題解決と素子作製への応用について研究を行った。

i) 熱エッチングは化学的加工法であるため、加工形状は結晶の異方性が強く表れると考えられる。塩素ガス熱エッチングで酸化膜をマスクに微細加工するとその側壁には傾斜面が形成されるが形成機構は明らかでない。そこで 4H-SiC の異方性と傾斜面形成機構を明らかにした。オフ角度の異なる基板を用いて SiC の加工速度を調べ、そのエッチング機構を提案した。傾斜面の傾斜角度をマスク酸化膜の膜質とエッチング条件で制御できた。

ii) 4H-SiC を熱エッチングして得られる傾斜面をチャンネルに用いたトレンチ型金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ(MOSFET)を作製した。トレンチ型 MOSFET はプレーナー型に比べて低抵抗・大電流化・小セルピッチ化に有利である。熱エッチングで{1106}面を形成しこれをチャンネルに用いトレンチ MOSFET を作製した。MOSFET のトランジスタ動作を確認し、熱エッチングで形成された表面が電子素子に利用できることが判明した。

iii) 上記、i)で得た知見を元にプラズマ加工で生じやすいサブトレンチを解消した。プラズマ加工で 4H-SiC (0001) C 面にトレンチ及びサブトレンチを形成し、熱エッチング処理でトレンチ幅を大きく変えることなくサブトレンチのみが解消できた。トレンチ底部には{0338}や{1125}面が形成された。加工速度が C 面の 1/230 程度の Si 面のトレンチを熱エッチングすると{0338}面が形成された。{0338}、{0338}面はシリコンの{001}に相当し、SiC MOSFET の高移動度が報告されているが基板の入手が困難な{0338}面が市販の 4H-SiC Si 面上の基板に高密度に形成できる知見を得た。

以上の成果により、塩素ガスを用いた SiC の熱エッチング機構に関して新たな知見が得られたと同時に、本手法が電子素子作製プロセスに適用できることが明らかになった。

## (論文審査結果の要旨)

ワイドバンドギャップ半導体材料の4H型炭化ケイ素(4H-SiC)は、超低損失電力制御素子材料として強く期待されている。高性能な素子構造実現には表面に微細加工が求められる。SiCは化学的に安定であり、一般的に物理的処理であるプラズマ加工法が用いられるが、プラズマ損傷やマスク材が課題である。そこで、本研究では化学的加工法である高温塩素ガス熱エッチング法でSiCの微細加工を試みた。シリコン酸化膜を加工マスクに熱エッチングすると、その側壁には結晶損傷のない傾斜面が形成される。しかし、SiCの異方性や傾斜面形成機構は明らかでなく、さらに傾斜面が超低損失電子素子に用いることが出来るか不明である。そこで、本研究ではi)4H-SiCを熱エッチングして得られる傾斜面形成機構の解明、ii)超低損失電力制御素子への適用、iii)熱エッチングを用いた従来のプラズマ加工法の課題解決と素子作製への応用について研究を行った。

i) 熱エッチングは化学的加工法であるため、加工形状は結晶の異方性が強く表れると考えられる。塩素ガス熱エッチングで酸化膜をマスクに微細加工するとその側壁には傾斜面が形成されるが形成機構は明らかでない。そこで4H-SiCの異方性と傾斜面形成機構を明らかにした。オフ角度の異なる基板を用いてSiCの加工速度を調べ、そのエッチング機構を提案した。傾斜面の傾斜角度をマスク酸化膜の膜質とエッチング条件で制御できた。

ii) 4H-SiCを熱エッチングして得られる傾斜面をチャンネルに用いたトレンチ型金属-酸化膜-半導体電界効果トランジスタ(MOSFET)を作製した。トレンチ型MOSFETはプレーナー型に比べて低抵抗・大電流化・小セルピッチ化に有利である。熱エッチングで{1106}面を形成しこれをチャンネルに用いトレンチMOSFETを作製した。MOSFETのトランジスタ動作を確認し、熱エッチングで形成された表面が電子素子に利用できることが判明した。

iii) 上記、i)で得た知見を元にプラズマ加工で生じやすいサブトレンチを解消した。プラズマ加工で4H-SiC(0001)C面にトレンチ及びサブトレンチを形成し、熱エッチング処理でトレンチ幅を大きく変えることなくサブトレンチのみが解消できた。トレンチ底部には{0338}や{1125}面が形成された。加工速度がC面の1/230程度のSi面のトレンチを熱エッチングすると{0338}面が形成された。{0338}、{0338}面はシリコンの{001}に相当し、SiC MOSFETの高移動度が報告されているが基板の入手が困難な{0338}面が市販の4H-SiC Si面上の基板に高密度に形成できる知見を得た。

以上のように、本論文において、塩素ガスを用いたSiCの熱エッチング機構に関して新たな知見が得られたと同時に、本手法が電子素子作製プロセスに適用できることが明らかになった。その成果は、学術的に新しい知見を見出していると同時に、超低損失電力制御素子として期待されているSiC電子素子の実現に大きな寄与を果たすものと判断され、審査委員一同は、本論文を博士(工学)論文として認定した。