

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560371

研究課題名(和文) 直接窒化層を用いた SiC MIS 構造の作製と電力用 FET への応用

研究課題名(英文) Preparation of SiC MIS structure with direct nitridation layer and its appreciation to power MOSFE

研究代表者

上村 喜一 (KAMIMURA, Kiichi)

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号：40113005

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000 円

研究成果の概要(和文)：高周波グロー放電によるプラズマ窒化が SiC 表面に窒化層を形成する手段として有効であることを示した。とりわけ、窒素に少量の水素を添加することで窒素ラジカルが活性化され、相対的に酸化物相の少ない窒化層を実現できた。また、この直接窒化層を界面制御層として用いることにより SiO<sub>2</sub>/窒化層/SiC MIS 構造の界面特性を向上させることができた。さらに、様々な条件で熱処理を試みた結果、水素雰囲気酸化の熱処理により界面特性を改善できることを見いだした。これらの成果は単に MISFET のゲート絶縁膜としての応用だけでなく、SiC 素子に対して安定で界面欠陥の少ない表面保護層を実現するための基礎技術として有効である。

研究成果の概要(英文)：Plasma nitridation with RF glow discharge was found to be effective method to prepare a nitride layer on SiC surface. Small amount of hydrogen gas was added to the nitrogen gas to improve the activity of nitrogen radicals. The oxide phase was effectively removed in the surface nitridation layer by this method, but small amount of oxide was still detected in the nitride layer. Post deposition annealing in hydrogen atmosphere was effective to deduce the interface state density of SiO<sub>2</sub>/nitride/SiC MIS structure. These results were useful not only for the gate of SiC MISFET but also for the surface passivation of all SiC devices, because of its low interface state density.

研究分野：半導体工学

キーワード：炭化ケイ素 SiC 直接窒化 MIS 界面制御

### 1. 研究開始当初の背景

SiC を用いた MISFET は Si の物性限界を超える電力用 FET として期待され、すでに実用化・市販されている。しかしながら、ゲート絶縁膜と SiC との界面特性が未解明であり様々な問題を残している。素子特性の飛躍的な改善にはその解明が不可欠である。

この課題に対して SiC 表面を NH<sub>3</sub> により直接窒化することで図 1 に示したような窒化層を SiC 表面に形成できることを他に先駆けて見出した。この直接窒化層を界面制御層

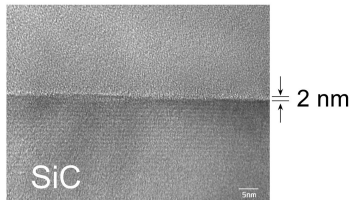


図 1 NH<sub>3</sub> 窒化層の断面 TEM 像

として FET のゲート絶縁膜に用いることにより、SiC の物性的優位性を有効に反映した高性能電力用 FET の実現が期待できる。

SiC と絶縁膜の界面は Si と SiO<sub>2</sub> の界面に比べて劣る原因は SiC の構成元素である C の一部が C クラスタとして SiO<sub>2</sub> 中に残留するためとされている。そこで、酸化に代えて直接熱窒化を採用することにより MIS 界面に起因する問題を解決し SiCMISFET を実用化することを目指した。

高速、大電力、高温で動作する低損失電力制御用半導体素子には、電力供給分野はもとより自動車や家電製品の電力制御など極めて広い分野で現在の Si の物性限界を超える素子性能が要求されており、その市場規模は 20 兆円を超すとされている。これに対して現在 GaN 系化合物半導体を用いた HEMT と SiCMISFET の 2 分野が目目され、広く世界的に研究・開発が進められている。直接熱窒化法の確立により電力用 SiCMISFET 開発にブレークスルーもたらすことが期待できる。

C の炭化物 C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> が安定な絶縁体であるということに着想を得て、SiC を直接窒化することによる C クラスタに関連する問題の解決を試みたが、形成される窒化層は極めて薄いことが判明した。種々検討の結果、これを界面制御層として用いることが有効であるという結論に至った。

予備的な実験では、1100°C 以上の高温で NH<sub>3</sub> と反応させることにより SiC 表面に非晶質な窒化層が形成されることを見出し、SiC に関する国際会議等で報告して評価を得た。しかしながら、窒化膜の成長速度は極めて遅く、MIS 素子のゲート絶縁膜として使用可能な耐圧の膜厚を得ることは困難であった。

そこで、プラズマや熱フィラメントを用いて励起状態の窒化種を発生させ、より厚い窒化層を得ることを試みたが熱窒化に比べて膜厚の著しい増加は認められなかった。この

原因を検討するために、膜厚と窒化時間の関係を検討した結果、窒化層の厚さは、形成された窒化層中の窒化種の拡散係数で制限され、数 nm 以上の厚さを得ることは事実上不可能であることを明らかにした。一方でこのことは直接窒化層が極めて安定であることを意味しており、SiC と絶縁膜との界面制御層として有効であることを示唆している。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は直接熱窒化法の確立により電力用 SiCMISFET 開発に新しい手法を実現することである。SiC の直接窒化層は

- ・極薄でかつ安定な非晶質層が形成される、
- ・SiC との界面特性が良好である、

という特徴を持っている。SiC の直接窒化により形成される表面層は極めて薄くかつ安定であることに加えて、SiC との界面特性も良好であるという結果から、窒化後に堆積法で絶縁膜を形成することにより、実用的な絶縁膜厚と良好な界面特性を持つ SiCMIS 素子が実現できる。

堆積 SiO<sub>2</sub> / 直接窒化層 / SiC 構造のゲートを持つ SiCMISFET を試作し、実用性を示す。このため、まず堆積法により SiC 上へ信頼性の高い SiO<sub>2</sub> 膜を形成できることを示す。さらに、堆積 SiO<sub>2</sub> / 直接窒化層 / SiC 構造を SiCMISFET のゲート絶縁膜として用いるための評価を行った。

SiC パワーデバイスを目的とした大きなプロジェクトも進められているが、MIS 界面特性の解明等の基礎的な検討は保留したまま、SiC の大口径化や FET の大電力化など実用に直結した方向で進められている。界面特性の問題を堆積 SiO<sub>2</sub> / 直接窒化層 / SiC 構造を用いることで解決することにより、SiC の物性的優位性に基づく高性能パワー MISFET の実現が可能となる。

電力制御の分野では SiC 素子を Si 素子理想的と置き換えることで、日本全体のエネルギー利用効率を大幅に改善できるという試算もあり、社会的な意義は大きい。さらに、SiCMISFET の実現により、各種エンジン近傍等の高温環境における半導体素子の利用範囲を拡大することができる。

### 3. 研究の方法

高品位エピタキシャル基板を使用した堆積 SiO<sub>2</sub> / 直接窒化層 / n-SiCMIS 構造を作製し、優れた界面特性を実証する。これまでは予算的な制約から安価な Research Grade 基板を使用せざるを得ないことが研究の進展を妨げていた。本補助金により高品位基板を購入し、これを使用した堆積 SiO<sub>2</sub> / 直接窒化層 / n-SiC 構造を作製して基板の欠陥の影響等を排除した界面特性の評価を行い、直接窒化層を利用することで良好な界面特性を実現できることを示した。

(1) プラズマ窒化法による SiC 表面への直接

### 窒化相の形成

直接窒化処理により SiC 表面に窒化物を含む反応層を形成できることを示したが、より反応性を増して効果的に窒化反応を行わせるために、グロー放電により窒素をプラズマ化して用いることを試みた。

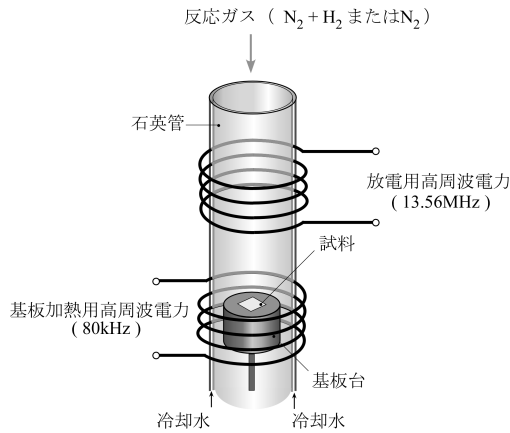


図 2 プラズマ窒化装置の概略

図 2 は直接窒化に使用した装置の概略を示したものである。水冷された 2 重石英管により 1600°C まで基板を加熱できる。グロー放電プラズマの励起には 13.56MHz の高周波電力を使用した。

さらに、窒化反応を促進するために、純窒素に少量の水素を添加した反応ガスをプラズマ化して用いることを試みた。

形成された窒化相の化学的評価には X 線光電子分光分析装置 (XPS) を使用した。窒化処理後の SiC 表面を XPS で解析することにより、純窒素プラズマを用いた場合とこれに水素を添加した場合について比較検討した。

### (2) 絶縁膜/SiC 界面特性の検討

絶縁膜と SiC の界面特性を検討するために、MIS 構造の容量電圧特性の解析を行った。図 3 は試料の構造を示したものである。直接

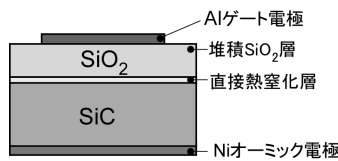


図 3 試料の形状

窒化層がきわめて薄いため MIS 容量電圧特性を解析するためには窒化層の上に SiO<sub>2</sub> を堆積する必要があった。SiO<sub>2</sub> の体積にはケイ酸エチル (TEOS) を原料とする熱 CVD 法を用いた。

### (3) SiCMISFET の試作

多結晶 Si とのヘテロ接合によりソース・ドレインを形成した SiCMISFET の試作を行っ

た。一般にソース・ドレイン領域はイオン注入により形成されるが、高温の活性化処理を必要とされるため、絶縁膜との界面特性が損なわれる可能性がある。そこで、高温工程を必要としないソース・ドレイン形成方法を考え、多結晶 Si とのヘテロ接合を採用した。

## 4. 研究成果

### (1) 直接窒化相の形成と評価

窒化ガスの純窒素に少量の水素を混入することで酸化反応が抑制され、効果的に窒化相をえることができることを見いだした。

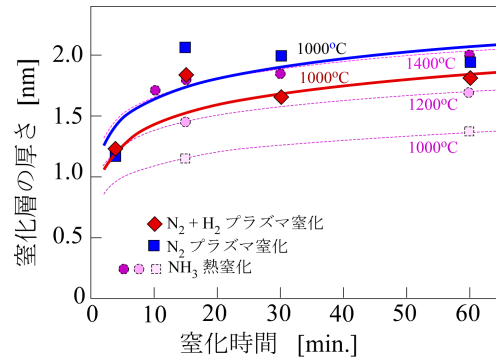


図 4 窒化層の厚さと窒化時間の関係

図 4 はプラズマ窒化法により形成した窒化層の厚さと窒化時間の関係を示したものである。比較のため過去に行った熱窒化の場合も同時に示した。プラズマを利用することにより低い温度で窒化反応が促進されていることがわかる。しかしながら、窒化層の厚さは 2nm 程度で飽和し、これ以上厚い層の形成は不可能であった。

XPS により窒化層の化学組成を調べた結果を図 5 に示した。図から、プラズマ中に水素を少量導入することにより酸化反応が抑制され、窒化層が有効に形成されていることがわかる。

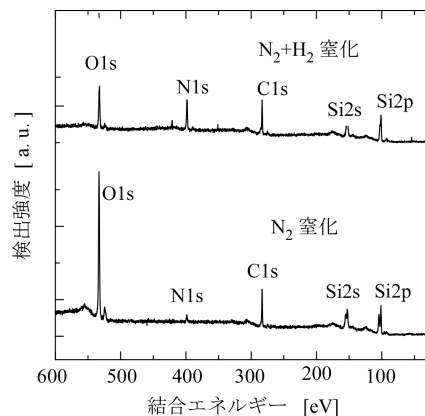


図 5 窒化層の化学組成の評価結果

### (2) 界面特性の評価結果

直接窒化層を界面制御層として用いることにより、界面特性が向上することがわかった。また、水素をプラズマ中に混入させると、

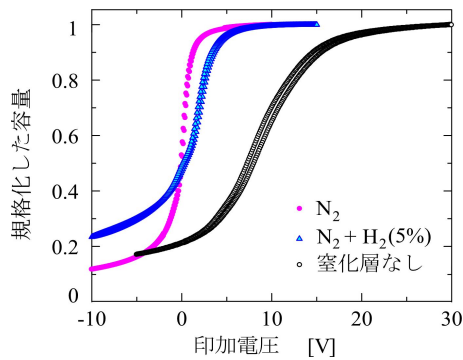


図 6 SiO<sub>2</sub>/窒化層/SiC MIS ダイオードの容量電圧特性 (1MHz)

伝導帯に近い部分の界面準位密度が少し高くなるが、禁制帯中央付近では低い界面準位密度が得られた。

図 6 は容量電圧特性について界面制御層として直接窒化層を挿入させた試料と界面制御層を持たないものとを比較して示したものである。図から、界面制御層を用いることにより界面特性が向上していることが示唆される。

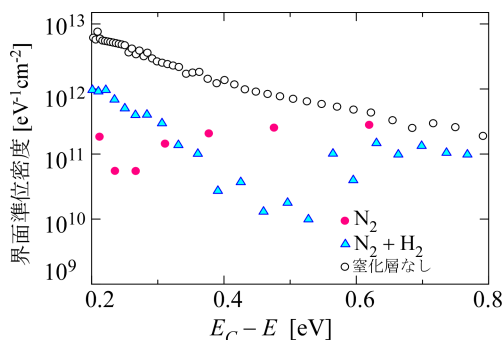


図 7 界面準位密度

図 7 は図 6 の特性から Terman 法で求めた界面準位密度分布である。プラズマ窒化層を界面制御層として用いることにより、界面準位密度を 1 桁程度低くすることができた。界面特性に対する水素の少量添加の効果は明確ではないが、禁制帯中央付近では純粋な窒素を用いた場合よりも低い値が得られている。

### (3) SiCMISFET の試作

ソース・ドレインを多結晶 Si とのヘテロ接合で作製した SiCMISFET の静特性を図 8 に示した。チャンネル長は 20 $\mu$ m、チャンネル幅は 200 $\mu$ m、ゲート絶縁膜として用いた SiO<sub>2</sub> の厚さはおよそ 80nm である。図からわかるように、FET の動作を確認することはできたが、ソースからのキャリア注入が不十分であったため十分な性能は得られていない。今後さらに検討する必要がある。

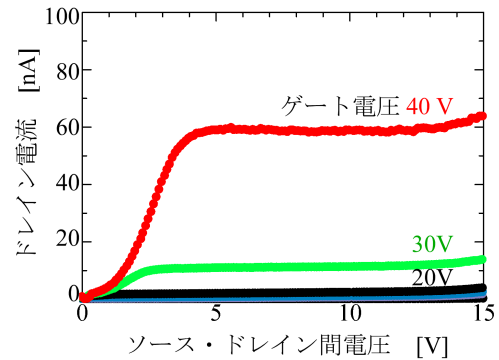


図 8 試作した SiC MISFET の静特性

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計 4 件)

Y. Akahane, K. Kimura, T. Kano, Y. Watanabe, S. Fujimaki and K. Kamimura, "Plasma Nitridation of 4H-SiC by Glow Discharge of N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> Mixed Gases", Materials Science Forum, 査読有り, Vols 821-837, 2015, 504 - 507. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.821-823.504

Y. Akahane, T. Kano, K. Kimura, H. Komatsu, Y. Watanabe, T. Yamakami, and K. Kamimura, "Preparation and Characterization of Nitridation Layer on 4H SiC(0001) Surface by Direct Plasma Nitridation", Materials Science Forum, 査読有り, 778-780, 2014, 631-634. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.778-780.631

M. Hemmi, Y. Sakai, T. Yamakami, R. Hayashibe, K. Kamimura, "Preparation and Characterization of Deposited Tetraethylorthosilicate - SiO<sub>2</sub>/SiCMIS Structure", Materials Science Forum, 査読有り, 740-742, 2013, 805-808. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.740-742.805

M. Hemmi, Y. Sakai, T. Yamakami, R. Hayashibe, K. Kamimura, "Preparation and Characterization of Deposited Tetraethylorthosilicate - SiO<sub>2</sub>/SiCMIS Structure", Materials Science Forum, 査読有り, 740-742, 2013, 805-808. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.740-742.805

M. Hemmi, Y. Sakai, T. Yamakami, R. Hayashibe, K. Kamimura, "Preparation and Characterization of Deposited Tetraethylorthosilicate - SiO<sub>2</sub>/SiCMIS Structure", Materials Science Forum, 査読有り, 740-742, 2013, 805-808. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.740-742.805

(学会発表)(計 9 件)

狩野巧生・赤羽桂幸・小林悠太・山上朋彦・上村喜二, 「TEOS を用いた熱 CVD 法による 4H-SiC MIS 特性に対する H<sub>2</sub> アニールの効果」, 電子情報通信学会技術研究報告(電子部品材料研究会)CPM2014-109, pp.25-28, 2014 年 10 月 24 日, 長野市. 赤羽桂幸, 狩野巧生, 荻野航弥, 小林悠太, 山上朋彦, 上村喜二, 「プラズマ直接窒化法による SiC 表面の窒化处理と窒化層の熱的安定性」, 電子情報通信学会技術研究報告(電子部品材料研究会)CPM2014-77, pp.13-16, 2014 年 9 月 4 日, 米沢市.

赤羽桂幸, 木村恭輔, 荻野航弥, 狩野巧生, 小松広樹, 山上朋彦, 上村喜一, 「直接窒化処理における SiC-MIS 構造への H<sub>2</sub> 混合ガス雰囲気の影響」, 応用物理学会北陸・信越支部第 2 回有機・無機エレクトロニクスシンポジウム, P-14, 2014 年 7 月 11 日, 長野市.

狩野巧生, 小松広基, 小林悠太, 赤羽桂幸, 山上朋彦, 上村喜一, 「TEOS を用いた低温 CVD 法による SiC MIS 特性に対するアニールの影響」, 応用物理学会北陸・信越支部第 2 回有機・無機エレクトロニクスシンポジウム, P-16, 2014 年 7 月 11 日, 長野市.

赤羽桂幸, 狩野巧生, 荻野航弥, 山上朋彦, 上村喜一, 「熱処理による SiO<sub>2</sub>/SiON/SiC 構造の特性改善」, 応用物理学会北陸・信越支部学術講演会, 7-D-2, 2014 年 11 月 7 日, 金沢市.

赤羽桂幸, 狩野巧生, 木村恭輔, 小松広基, 渡邊幸宗, 山上朋彦, 上村喜一, 「プラズマ窒化法による 4H-SiC 上への窒化層作製と評価」, 応用物理学会北陸・信越支部学術講演会, 22p-C-1, 2013 年 11 月 22 日, 富山市.

T. Kanou, T. Sakai, T. Yamakami, K. Kamimura, "Effect of post-deposition annealing on interface properties of deposited Tetraethylorthosilicate - SiO<sub>2</sub>/SiC MIS structure", Technical Digest of The 4th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies, P3-39, 2013 年 6 月 19 日, 金沢市.

狩野巧生, 赤羽桂幸, 木村恭輔, 小松広基, 山上朋彦, 上村喜一, 「TEOS を用いた熱 CVD 法による 4H-SiC MIS 特性に対するアニールの効果」, 第 22 回 SiC 及び関連半導体講演会, B-20, 2013 年 12 月 9 日, さいたま市.

酒井崇史, 逸見充則, 赤羽桂幸, 狩野巧生, 丸山洋平, 山上朋彦, 林部林平, 上村喜一, 「TEOS を用いた SiO<sub>2</sub>/SiC 構造の作製と評価」, 第 21 回 SiC 及び関連ワイドギャップ半導体講演会, P-36, 2012 年 11 月 19 日, 大阪市.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

上村 喜一 ( KAMIMURA, Kiichi )

信州大学・学術研究院工学系 教授

研究者番号: 40113005