

Alイオン注入4H-SiCの電気特性とダイオード特性(化合物半導体プロセス・デバイス・一般)

田島, 卓 / Nakamura, Tohru / Tajima, Taku / Kudoh, Takahiro / Miyagawa, Shingo / Satoh, Masataka / 中村, 徹 / 佐藤, 政孝 / 宮川, 晋悟 / 工藤, 尚宏 / 永田, 翔平

(出版者 / Publisher)

電子情報通信学会

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

電子情報通信学会技術研究報告. ED, 電子デバイス / 電子情報通信学会技術研究報告. ED, 電子デバイス

(号 / Number)

95

(開始ページ / Start Page)

75

(終了ページ / End Page)

78

(発行年 / Year)

2007-06-08

Al イオン注入 4H-SiC の電気特性とダイオード特性

佐藤 政孝[†] 宮川 晋悟[†] 工藤 尚宏[†] 永田 翔平[†] 田島 卓[†] 中村 徹[†]

[†]法政大学 〒184-8584 東京都小金井梶野町 3-7-2

E-mail: [†]mah@ionbeam.hosei.ac.jp

あらまし Al イオン注入 4H-SiC について、イオン注入層の電気特性と pn ダイオード特性のイオン注入熱処理温度依存性について評価している。イオン注入は、Al 濃度が $3 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ 、イオン注入層の厚さが約 200nm である Box 様プロファイルなるように行っている。1900°Cでの熱処理にイオン注入層のシート抵抗は $5.8 \text{ k}\Omega/\square$ 、Ti/Al オーミック電極の接触抵抗率は $2.5 \times 10^{-5} \Omega \text{ cm}^2$ であった。同時に評価した pn ダイオードでは、1,700 および 1800°Cにおける熱処理で作製したダイオードはリーク電流が多く、pn 接合界面にイオン注入欠陥の残留を示唆している。イオン注入された Al の電気的活性化とともに、1,900°Cでの高温熱処理が有効であることがわかった。

キーワード シリコンカーバイド、イオン注入、電気特性、ダイオード

Electrical Properties of Al Ion Implanted 4H-SiC Layer

Masataka SATOH[†] Shingo MIYAGAWA[†] Takahiro KUDOH[†] Shohei NAGATA[†]

Taku TAJIMA[†] and Tohru NAKAMURA[†]

[†]Hosei University 3-7-2 Kajinocho, Koganei, Tokyo 184-8584, Japan

E-mail: [†]mah@ionbeam.hosei.ac.jp

Abstract The electrical properties of p⁺n 4H-SiC diode formed by Al ion implantation have been investigated as a function of annealing temperature. Al ions are implanted to fabricate p-type layer with a level of $3 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ in the n-type epitaxial layer grown on n⁺ 4H-SiC substrate. The Al implanted sample, annealed below 1800 °C shows the forward current including the resistive current components and the reverse current ranged in the order of 10^{-4} A/cm^2 . The p⁺n diode formed by annealing at 1900 °C reveals the reverse current as low as 10^{-6} A/cm^2 . It is suggested that the annealing above 1900 °C is effective to reduce the implantation-induced defect at the interface between Al implanted p⁺ layer and the underlying n-type epitaxial layer.

Keyword SiC, Ion implantation, pn diode

1. はじめに

電気エネルギーの輸送、変換過程では数多くのパワーデバイスが使用されている。これらのパワーデバイスの低損失化と高性能化は、電力の効率的な利用に極めて重要である。Si を使ったパワーデバイスは微細加工技術を駆使して高性能化が図られてきた。しかし、それらは現在では Si の物性から期待できる性能限界に達しているため今後の飛躍的な発展は期待できない。一方、SiC (炭化珪素) は、Si-C 原子間距離が 0.189nm と短く、結合エネルギーが高い(約 4.5eV)。このことから、禁制帯幅、絶縁破壊電界が大きいなど、優れた物性値を有するため、次世代パワーデバイス材料として有望視されている。[1]

SiC は不純物の拡散定数が極めて小さいため、電気特性の制御はイオン注入法による不純物ドーピングとその後の活性化アニールによって行われる。しかし、イオン注入により作製した pn 接合ダイオードでは、活

性化アニール後に残留するイオン注入欠陥による順バイアス特性の劣化や、逆バイアスリーク電流の増加などが問題となる。[2] そのため、イオン注入により pn 接合ダイオードを作製するにはイオン注入欠陥を除去し、良好な電気特性を与える活性化アニールが重要となる。

本研究では n 形エピタキシャル基板への Al イオン注入によって形成した 4H-SiC の p⁺n 接合ダイオードについて、ダイオード特性とアニール条件の関係を評価した。

2. 実験

試料基板には n 形エピタキシャル層 ($N_d = 1 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 、厚さ: 5 μm) を成長した n 形 4H-SiC(0001) (オフ角: 4°) を用いた。p⁺層の形成には Al イオンを注入層の厚さが 350nm、不純物濃度が $3 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ となるように多段注入 (エネルギー: 30

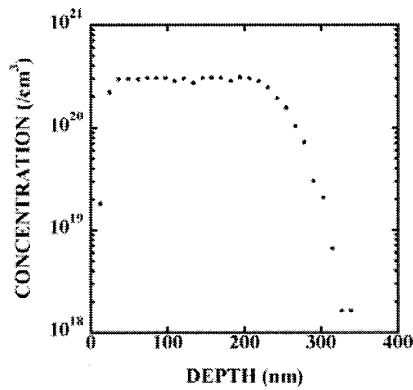


図1 Al不純物分布

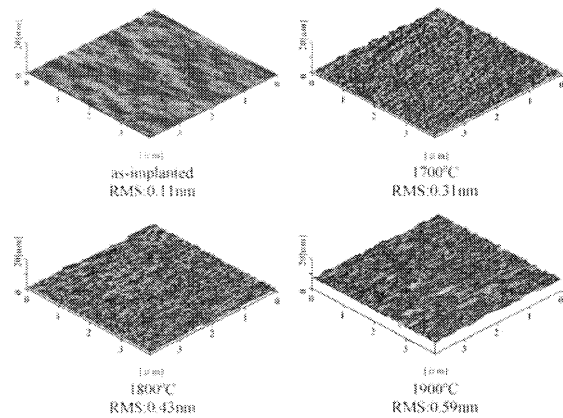


図3 Alイオン注入SiCの表面形状

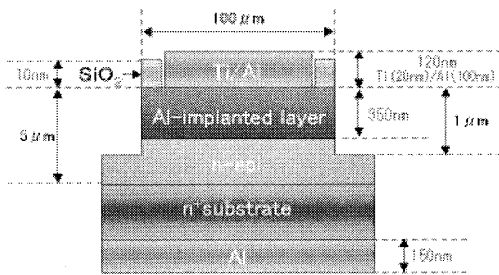


図2 試作したダイオードの断面構造

～170keV) を、試料基板を 500℃に加熱しながら行った。総注入量は $7.2 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ であった。図 1 には SRIM(The Stopping and Range of Ions in Matter)シミュレーション[3]を用いたイオン注入された Al の深さ分布の計算結果を示す。活性化アニールは電子衝撃アニール装置 (EBAS) を用いて 1700～1900℃において 1 分間行った。ダイオードは、CF₄+Ar を用いたドライエッチングにより深さ約 1μm、直径 100μm の円形メサ構造に加工した。イオン注入層へのオーミック電極は、Ti/Al (20nm/100nm) を Ar 流中で 900℃において 3 分間の熱処理を行うことで形成した。裏面電極には Al(150nm)を用いた。p⁺n 接合ダイオードの断面構造は図 2 に示す。活性化アニール後の表面モフォロジーの評価には原子間力顕微鏡(AFM)観察、イオン注入層の電気特性の評価にはホール効果測定、接触抵抗率の評価には TLM 測定、ダイオードの電気特性の評価には I-V 測定を行った。

3. 結果と考察

図 3 に Al イオン注入直後と 1700～1900℃において 1 分間のアニールを行った試料から得られた試料表面の AFM 像を示す。Al イオン注入直後は表面荒さ(RMS) は 0.11nm と非常に平坦な表面状態であった。一方、ア

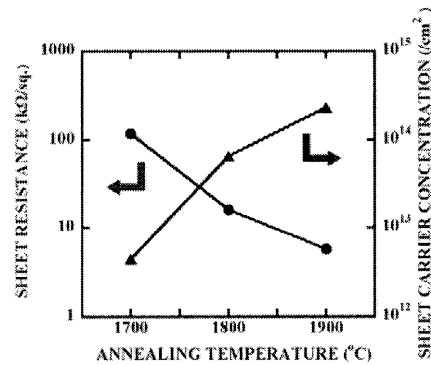


図4 Alイオン注入SiCにおけるシート抵抗とシートキャリア濃度の熱処理温度依存性

ニールを行った試料ではアニール温度の増加に伴い、表面荒さは増加した。しかし、1700 および 1800℃において 1 分間のアニールを行った試料ではイオン注入直後に比べ表面状態の変化は確認されるが、表面荒さは約 0.3～0.4nm と平坦な表面状態を維持した。1900℃において 1 分間のアニールを行った試料表面には穴が観察されるが表面荒さは 0.59nm であり、平坦な表面状態を維持している。アニールに EBAS を用いることで、ステップバンチングなどの表面荒れが抑制されている。

図 4 に 1700～1900℃において 1 分間の活性化アニールを行った試料から得られた、シート抵抗とシートキャリア濃度のアニール温度依存性、および図 5 に Ti/Al オーミック電極の接触抵抗率のアニール温度依存性を示す。

アニール温度の増加に伴い、Al アクセプターの活性化によるシート抵抗の減少が確認された。1900℃において 1 分間の熱処理を行った試料から得られたシート抵抗は 5.8kΩ/sq、シートキャリア濃度は $2.3 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ であった。

一方、Ti/Al オーミック電極の接触抵抗率はアニール温度の増加に伴い減少した。接触抵抗率はシート抵抗に比例することから、アニール温度の増加によるシート抵抗の減少により接触抵抗率が減少したと考えられる。

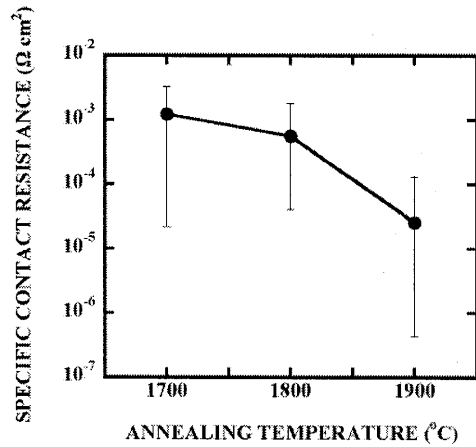


図5 Alイオン注入SiC上に形成したTi/Al電極の接触抵抗率

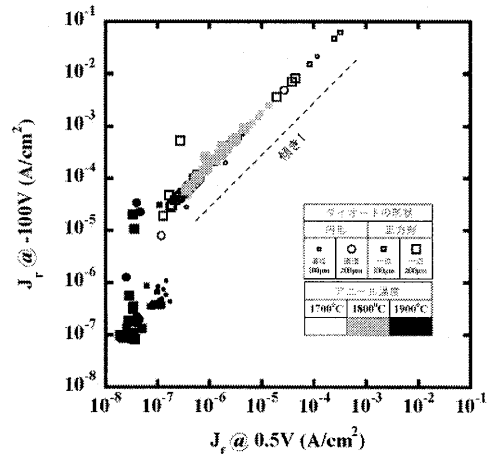


図7 順・逆バイアス(0.5・-100V)印加時の電流密度の相関

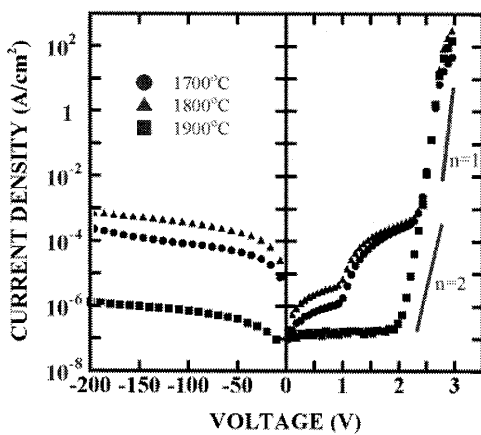


図6 Alイオン注入SiCダイオード特性

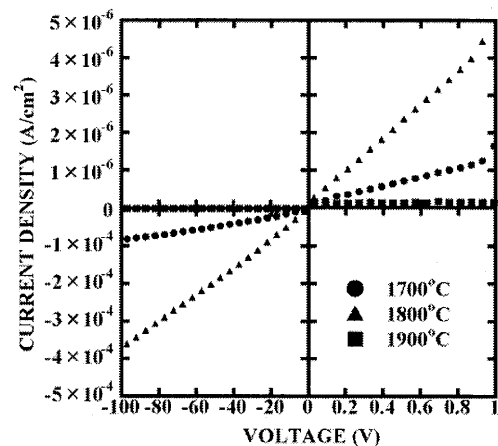


図8 -100~1Vにおける電流密度-電圧特性

1900°Cにおいて1分間のアニールを行った試料から得られた接触抵抗率は $2.5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ であった。

図6に1700~1900°Cにおいて1分間のアニールを行った試料から得られた電流密度-電圧特性を示す。それぞれの温度においてアニールを行った試料からはダイオード特性が得られ、注入層/基板界面においてpn接合が形成されていること確認された。

1700 および 1800°Cにおいて1分間のアニールを行った試料では、0~1Vの順バイアス範囲において抵抗成分が確認される。また、約1V~2Vにおいて4H-SiCとは異なるダイオード成分によると考えられる電流の増加があり、pn接合近傍の結晶欠陥に起因すると考えられる。これらの欠陥によって、-100V印加時にリーク電流密度が $1 \times 10^{-4} \text{A/cm}^2$ 程度に増加していると考えられる。

一方、1900°Cにおいて1分間のアニールを行った試料では順バイアスにおいて、欠陥に起因すると考えられる電流の増加は確認されない。また、電流密度-電圧特性の傾きから、2.0~2.5Vにおいては電子とホー

ルの再結合電流が、2.5~2.7Vにおいては拡散電流が支配的であると考えられる。逆バイアスでは-100V印加時のリーク電流密度は $7 \times 10^{-7} \text{A/cm}^2$ 程度であり1700~1800°Cにおいてアニールを行った試料に比べ二桁以上の改善が確認できた。

図7に示すように1700および1800°Cにおいてアニールを行った試料では-0.5V印加時の電流密度と-100V印加時の電流密度には相関が確認できる。このことから0~1Vの順バイアス範囲において確認される電流の増加とリーク電流の増加は同一の原因によるものであると考えられる。一方、1900°Cにおいてアニールを行った試料では0.5Vおよび-100V印加時の電流密度は1800°C以下においてアニールを行った試料に比べ大幅に減少している。

また、図8に示すように-100~1Vにおいて電流は印加電圧に対してオーム則にしたがって増加した。このことから図6に示したような順バイアスにおいて0Vから確認される電流の増加およびリーク電流の増加は抵抗成分に起因するものであることが確認された。一

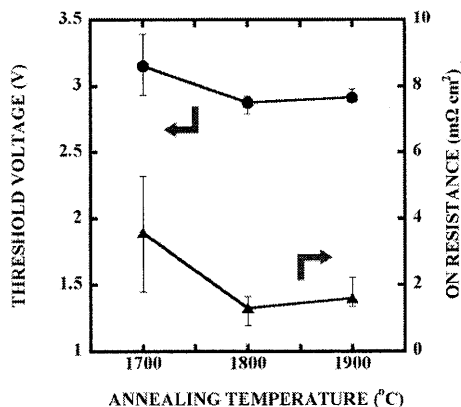


図9 閾値電圧、オン抵抗のアニール温度依存性

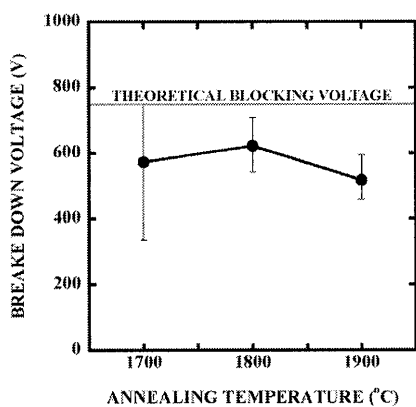


図10 ブレイクダウン電圧のアニール温度依存性

方、1900°Cにおいてアニールを行った試料では-100~1Vにおいて電流はほとんど流れていない。

これらのことから1800°C以下においてアニールを行った試料のpn接合界面近傍の結晶欠陥に起因すると考えられる抵抗成分が1900°Cにおけるアニールにより除去できていることが示唆される。

図9に閾値電圧およびオン抵抗のアニール温度依存性を示す。ここで、閾値電圧は順バイアスにおいて電流密度が100A/cm²得られたときの電圧、オン抵抗はこのときの電流密度-電圧特性の傾きの逆数とした。1700°Cにおいて1分間のアニールを行った試料から得られたオン抵抗は3.6mΩ·cm²であった。また、1800°Cにおいて1分間のアニールにより、オン抵抗は1.3mΩ·cm²へ減少した。これはアニール温度の増加に伴うイオン注入層のシート抵抗やTi/Alオーミック電極の接触抵抗率の減少によるダイオードの直列抵抗の起因しているものと考えられる。しかし、1900°Cにおいて1分間のアニールを行った試料から得られたオン抵抗は1.6mΩ·cm²であり、シート抵抗や接触抵抗率に

依存していない。このためオン抵抗はn-epi層の抵抗が支配的であると考えられる。

一方、1700°Cにおいて1分間のアニールを行った試料から得られた閾値電圧は3.2Vであった。1800°C以上の温度におけるアニールにより閾値電圧は約2.9Vへ低下した。これは上述したオン抵抗の減少により、低い電圧で閾値電流密度(100A/cm²)が得られたことに起因している。

図10に1700~1900°Cにおいて1分間のアニールを行った試料から得られたブレイクダウン電圧のアニール温度依存性を示す。p⁺n接合ダイオードの理想ブレイクダウン電圧はSiCの絶縁破壊電界強度(3MV/cm)とn形ドリフト層の厚さ(5μm)から750V程度と期待できる。それぞれの温度においてアニールを行った試料から得られた耐圧は500~600V程度であり理論耐圧の69~83%の耐圧が得られた。

4. 結論

1800°C以下において1分間のアニールを行った試料から得られたp⁺n接合ダイオードの電流密度-電圧特性から、pn接合界面に存在すると考えられる抵抗および4H-SiCとは異なるダイオード成分に起因すると考えられるリーク電流が増加(-100V印加時: 1 x 10⁻⁴A/cm²)することがわかった。

一方、1900°Cにおいて1分間のアニールを行った試料から得られたp⁺n接合ダイオードの電流密度-電圧特性から1800°C以下におけるアニールを行った試料に存在していると考えられる欠陥の消滅が示唆された。また、それに伴いリーク電流が減少した。(-100V印加時: 7 x 10⁻⁷A/cm²)このダイオードから得られたオン抵抗は1.6mΩ·cm²、閾値電圧は2.9V(@100A/cm²)、耐圧は519Vであった。

以上のことからAlイオン注入により形成したp⁺n接合ダイオードの活性化アニールは1900°C程度の高温で行うことによりダイオード特性を改善させることが確認された。

文 献

- [1] G.L. Harris(Ed.): *Properties of Silicon Carbide*, EMS Datareviews Series No. 13 (INSPEC, New York, 1995)
- [2] H. Fujisawa, T. Tsuji, S. Izumi, K. Ueno, I. Kamata, T. Tsuchida, T. Jikimoto and K. Izumi. *Mater. Sci. Forum*, **389-393**, 1297 (2002)
- [3] J. F. Ziegler, J. P. Biersack, and U. Littmark, *THE STOPPING AND RANGE OF IONS IN SOLIDS*