

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05328

研究課題名(和文) シリコンキャップアニールによるSiC表面の制御とシリサイドレスコンタクトの研究

研究課題名(英文) Investigation on control of SiC surface and silicide-less contact using silicon-cap-annealing

研究代表者

花房 宏明 (HANAFUSA, HIROAKI)

広島大学・先進理工系科学研究科(先)・准教授

研究者番号：70630763

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では炭化ケイ素(SiC)半導体上に堆積した非晶質シリコン(a-Si)層をアニールするシリコンキャップアニール(Silicon-Cap Anneal: SiCA)によりシリサイド化を行わなくとも金属をSiCに接触させるだけでオーミックコンタクトが形成される特異な現象とSiの融点をはるかに下回る温度でSi層がドット化する現象について研究を行った。

SiCAによるSiC表面のエネルギーバンド構造とオーミックコンタクトが形成される状態についてのモデルを示した。また、Siの融点をはるかに下回る温度でSiドットと開口部を持たないシリコンマイクロドーム構造の形成を新たに見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた成果は省エネルギー社会の基幹デバイスであるパワー半導体デバイス材料であるシリコンカーバイド半導体において、オーミックコンタクトが形成される表面の理解を深化させた。また、融点をはるかに下回る温度でSi層をドット化・結晶化させる手法の進展はデバイス作製における省エネルギー化を実現し、開口部を持たない新しい構造のSiマイクロドームの発見は新たな機械的・光学的新デバイスの実現が期待される。

研究成果の概要(英文)：In this study, we investigated the ohmic contacts formation mechanism by silicon-cap anneal (SiCA), which anneals an amorphous silicon (a-Si) layer deposited on a silicon carbide (SiC) semiconductor. During the project, the energy band structure of SiC surface treated by SiCA and the model of the state where ohmic contacts are formed are presented. We also newly found the formation of Si dots and closed Si-micro-dome structures at the temperatures around 500 lower from the Si melting point.

研究分野：半導体デバイス

キーワード：炭化ケイ素 シリコン 表面欠陥 コンタクト シリコンドーム

1. 研究開始当初の背景

(1) パワー半導体素子はスマートフォンの充電器をはじめとした家電製品、発送電やモータなどの産業における電動機器、IOTを支える通信機器など、あらゆる箇所においてエネルギー制御の役割を担う基幹デバイスとなる。その中でも、ワイドバンドギャップ半導体は高耐圧・高耐熱性であることから次世代の省エネルギーデバイスとしてスマートグリッドやモータ、産業機器などあらゆる機器に搭載されることが期待されている。そのことから、低炭素化社会の実現に向けて極めて重要であると位置づけられている。パワー半導体デバイスの材料としてこれまではシリコン (Si) を用いて作製されてきたが、材料自体の特性や基板薄化の限界から飛躍的な性能向上が困難となっている。その代替として炭化ケイ素 (SiC) や窒化ガリウム (GaN)、酸化ガリウム、ダイヤモンド等の広い禁制帯幅を持つワイドバンドギャップ (WBG) 半導体を用いたパワー半導体素子開発が活発に行われている。

(2) 半導体デバイスにおいてデバイスと配線の接触部における電力ロスを低減するため、低抵抗のオーミック性電極を形成することが望ましい。そのため、各々の半導体材料に応じた仕事関数を有する金属を選択する必要がある。しかし、省エネルギー型パワーデバイスへの展開が進んでいる SiC をはじめ WBG デバイスは金属との仕事関数差が大きく、Si のようにオーミック特性を簡便に得ることが難しい。解決策として、例えば、SiC 中の拡散係数が大きい Ni などの金属を SiC 上に積層し、1000°C前後のアニールにより生じるシリサイド層を介して低抵抗コンタクトを形成する方法がとられている。この方法は SiC と Ni の相互拡散により界面の原子がミキシングすることで複雑化し、かつ、余剰の炭素凝集が起きる [1]。アニール方法や金属材料の組み合わせにより余剰 C の偏析を抑制することでシリサイド化電極の課題を解決するアプローチが種々報告されているが [2-4]、ミキシング層は依然として存在しており、これは SiC 表面と電極界面の接触に関する物性理解を妨げている。

(3) これまでに SiC 上に非晶質シリコン (a-Si) 層を 250°C で堆積した後に Si の融点よりも低い 1000~1280°C のアニールで Si 層が凝集・ドット化することを発見している。(図 1 (b)) さらに、その表面に Al などの金属を堆積するのみでオーミックコンタクトが形成されることを見出した。これを電極金属のシリサイド化アニールを不要とする SiC の新たなオーミックコンタクト形成技術 “SiCA” として提案している [5]。この SiCA 法を用いることで再び高温アニールを行っても低抵抗オーミックコンタクト特性が消失しないことが分かっている。これは、SiC デバイス作製プロセス特有の 1600°C 以上の超高温不純物活性化アニールや移動度向上を目的とした 1200°C 程度の窒化アニールの後に行わなければならない電極作製のためのアニール処理を不要とするアドバンテージを有する。

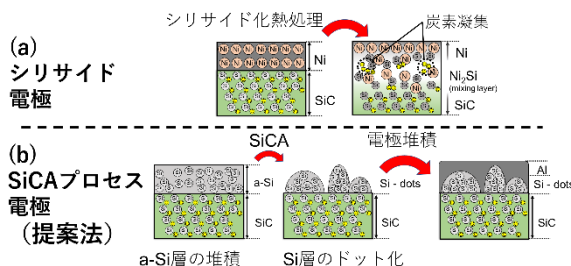


図 1 シリサイド電極と SiCA 電極の作製工程

2. 研究の目的

(1) これまでに SiCA 温度に対する Si 層の凝集率やコンタクト抵抗の関係、硬 X 線光電子分光測定を通じ、①図 2 に示すように Si 層の変動が始まるタイミングでコンタクト抵抗が低くなること、② SiCA 後に表面の Si 層を除去してもオーミックコンタクトが維持され、その表面は極めて高い平坦性を維持していること、そして③表面近傍でバンドが急峻に曲がっていることを明らかにしてきた。それにより、①なぜ融点よりも低い温度で Si がダイナミックに移動して凝集するのか？②SiCA された SiC 表面では何が起きているのか？それは何が引き起こしているのか？③オーミックコンタクト特性を示すバンド構造はどのようになっているのか？それは制御出来るものか？という問いが生じた。

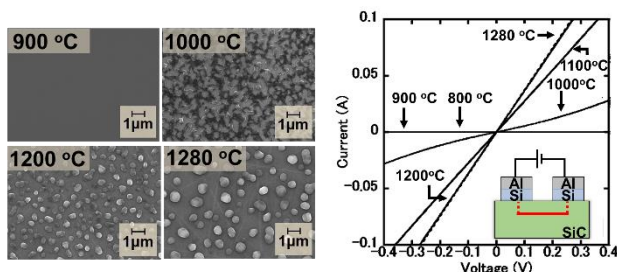


図 2 SiCA 後の表面と I-V 特性

(2) 本研究では上記の問いに立脚し、オーミックコンタクトが形成される SiC 表面の状態について明らかにすることを目的とした。これらにより SiCA によってもたらされる特異な現象を理解し、金属・半導体接合の学術分野の深化と新しい領域の開拓を目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) Si ドット形成に関する研究

これまででは水素化アモルファスシリコン (a-Si:H) 膜を SiC 上に堆積した後に脱水素処理を行った a-Si 層に対し、SiCA を施すことで Si 層のドット化を行っていた。Si 膜内の水素が抜け、膜の密度が疎となることで膜内の歪応力が変化し、融点よりも低い温度で結晶化がなされると想定した。また、水素は Si 原子の表面泳動長を伸ばすことが報告されている。このことから、脱水素処理を行わずに SiCA を行い、ドット形成に関する評価を行った。

#### (2) オーミックコンタクトが形成される SiC 表面状態の解析

SiCA 処理温度を変えた SiC ウエハを用いてショットキーバリアダイオード (SBD) を作製し、電流-電圧特性と DLTS 測定を用いて、SiCA 処理を施した SiC 表面のエネルギーバンド状態の推定と導入される欠陥に関する評価を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) Si ドット形成の低温化、Si マイクロドームの形成

SiC 基板上に形成した a-Si:H 薄膜を大気圧下で熱処理した。脱水素処理を行った場合は図 2 に示したように、1000°C 以上で Si 層のマイグレーションが生じたが、a-Si:H 膜では 900°C という低温で右図 3 に示すように、局所的にシリコン薄膜が膨張する特異な現象を見出した。さらに、Si の融点から 500°C 以上低い温度にもかかわらず膨張部においては直径 50 nm 程度の Si ドットが形成されていることが明らかとなった。これらのことから、水素を内包することで a-Si 膜内の歪応力が高まり、Si 原子の泳動と結晶化温度低下が示された。さらに、Si マイクロドーム膨張部においてはドットが形成され、これは膨張部でさらに歪応力が高まったことによるものを考えている。このことから、格子定数の大きく異なる Si と 4H-SiC 間に生じる歪応力と Si 膜自体の歪応力を制御することでさらに低温で Si ドットが形成できる可能性を見出した。また、Si マイクロドームは開口部を持たず、密閉型の中空構造を有している構造であることが分かった。

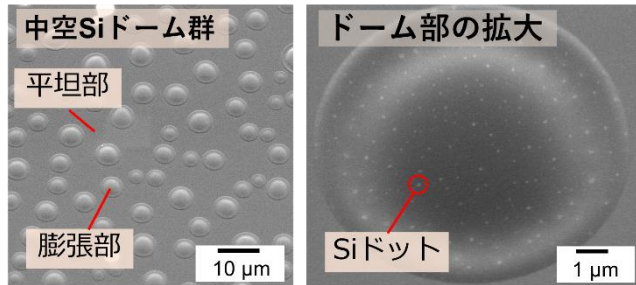


図 3 SiC ウエハ上に形成された Si マイクロドームと拡大部の電子顕微鏡像

#### (2) 電気特性評価による欠陥量や電気伝導機構の解析

図 4 に作製した SBD の電流-電圧特性を Thin-Surface-Barrier (TSB) モデル [6] を用いて解析し、電気特性をフィッティングした結果を、それを基に見積もった電極側から見た実質的なポテンシャルバリアーの SiCA 温度依存性を図 5 に示す。最高到達温度  $T_{\max} = 800^\circ\text{C}$  より表面に欠陥が導入され、 $T_{\max} = 1100^\circ\text{C}$  を超えると多量の欠陥が極表面に導入されていることが分かった。また、それに伴いエネルギー障壁高さが大きく減少していることが示された。このことから SiCA によって 4H-SiC 表面に  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  を超える欠陥が導入され、表面ポテンシャルが薄く急峻になることでオーミックコンタクトが形成されていることが考えられる。また、DLTS 測定により深い準位の欠陥について評価した。最も低抵抗のオーミックコンタクトが形成される  $1280^\circ\text{C}$  の熱処理条件ではリーク電流が大きいため DLTS 測定が困難であった。従い、SiCA 処理を行っていないサンプルとわずかに抵抗値の減少が現れる  $1100^\circ\text{C}$  の SiCA 処理サンプルにおいて比較を行った。その結果、どちらのサンプルにおいても、n 型 4H-SiC で検出される  $Z_{1/2}$  準位が検出され、SiCA を行ったサンプルにおいてはその密度が減少していることが示された。 $Z_{1/2}$  準位はライフタイムキラーとして働き、抵抗率増大の起因となる。一方で、電流電圧測定から見出したポテンシャルバリアーの増大を考慮すると、表面にドナーライク欠陥が増大していることが示唆されている。このことから、SiCA 処理を行った 4H-SiC 表面においては、浅い領域におけるドナーライク欠陥量が増大することでポテンシャルバリアーが薄く急峻に形成され、トンネル電流が増大する。また、深いエネルギー領域においてライフタイムキラーとして働く欠陥が減少することでコンタクト抵抗が大幅に低減していると考えられる。

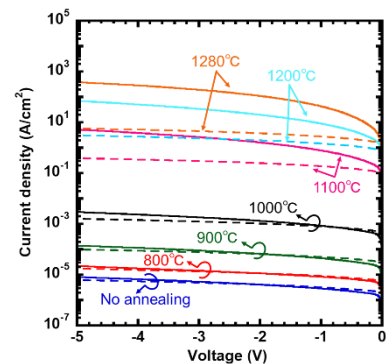


図 4 SBD の電気特性 (実線) と TSB モデルによるフィッティング結果 (破線)

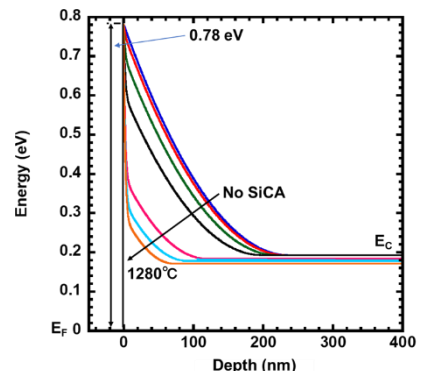


図 5 SiCA 処理した SiC 表面の伝導帯下端の状態

以上、研究期間を通じて SiCA が SiC 表面に及ぼす状態の評価を進め、エネルギーバンド状態の推定、表面に導入される欠陥の評価を通じてオーミックコンタクトが形成される SiC 表面の状態についてモデルを示した。また、SiCA のプロセスを基盤として、Si の融点をはるかに下回る温度で Si ドットが形成される結晶工学的に興味深い現象を新たに見出した。また、これにより Si と SiC の積層構造を利用した開口部を持たないドーム状構造の形成法を開発した。

これらのことから、オーミックコンタクトが形成される表面の理解が深化した。また、融点をはるかに下回る温度で Si 層がドット化・結晶化する手法の開発・進展はデバイス作製においては省エネルギー化を進め、また、開口部を持たない新しい構造の Si マイクロドームは新たな機械的・光学的な新デバイスの実現が期待される。

#### <引用文献>

- [1] T. Marinova, et al., Mater. Sci. Eng. B 46, 223(1997).
- [2] S. Y. Han, et al., Appl. Phys. Lett. 79, 1816 (2001).
- [3] V. K. Sundaramoorthy, et al., Mater. Sci. Forum 821-823, 444 (2015).
- [4] M. D. Silva, et al., Appl. Phys. Lett. 109, 012101 (2016).
- [5] H. Hanafusa. et al., Materials Science Forum 778-780, 649 (2014).
- [6] T. Hashizume, J. Kotani, and H. Hasegawa, Appl. Phys. Lett., 84 4884 (2004).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 花房 宏明、 東堂 大地、 東 清一郎
2. 発表標題 シリコンキャップアニールを行った4H-SiC表面の電気 伝導機構の解析
3. 学会等名 81回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 花房 宏明、東 清一郎
2. 発表標題 a-Si:H膜を用いたSiCへのシリコンキャップアニールと Si ドット形成の低温化
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------