

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25870466

研究課題名(和文)アモルファスシリコンを用いた欠陥制御型ヘテロジャンクション電極の開発と制御

研究課題名(英文)Development of defect-controlled hetero-junction contact with amorphous silicon insertion

研究代表者

花房 宏明 (HANAFUSA, HIROAKI)

広島大学・先端物質科学研究科・助教

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)：炭化ケイ素半導体(SiC)の新しい電極構造として高濃度不純物を注入したアモルファスシリコン(a-Si)半導体の欠陥制御層を挿入した電極金属/a-Si/SiC接合を形成し、バンドポテンシャル制御による低抵抗電極形成の研究を行った。

金属電極の熱処理を行わずに $2 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$ という実用に十分なコンタクト抵抗を実現し、欠陥制御a-Si中間層により大幅にポテンシャルエネルギーが低減されていることを明らかにした。これは提案する欠陥制御a-Si中間層のヘテロ接合により、バンドアライメント制御がなされていることを示している。これらの成果によりSiCデバイスの信頼性や特性向上が期待される。

研究成果の概要(英文)：Low-resistivity contact formation by band potential control with a high-impurity contained amorphous Si insertion layer was investigated for Silicon carbide (SiC) devices. Using a proposed method, effective contact property of  $2 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$  was achieved without annealing process of metal electrode. XPS measurement revealed that defect controlled a-Si insertion layer reduces potential energy offset. From these results, band offset alignment was controlled by proposed defect-controlled a-Si layer insertion. These results expected to increase SiC device reliability and properties.

研究分野：半導体工学

キーワード：炭化ケイ素 オーミックコンタクト シリコン挿入層

### 1. 研究開始当初の背景

パワー半導体素子はモータ等の電動機器や世界的な電力送電網の構築など次世代社会における低炭素化社会のエネルギー制御分野の役割を担うこととなる。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おり、注目されている。パワー半導体素子としてはこれまで、シリコン (Si) を基幹材料としてデバイスが作製されてきたが、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)、ダイヤモンド等の広い禁帯幅を持つワイドバンドギャップ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。また、Ge など、高移動度半導体を用いることで、大規模集積回路 (LSI: Large scale integrated circuit) の高性能化、省エネルギー化が期待されている。

そのような半導体デバイスにおいてはオーミック電極の形成が重要であり、各々の半導体に合わせた金属を選択する必要がある。しかし、それぞれ Ge はフェルミ準位のピンニングにより金属固有の仕事関数が反映され難く、また、SiC はピンニングの影響は小さいもののバンドギャップが大きいことにより金属とのポテンシャルエネルギー差が大きい。これらのことから、どちらの材料もオーミック特性を Si のように簡便に得ることは難しい。

解決策として n 型 Ge においては「低温で形成する極薄絶縁膜層の挿入」が提案されているが、それらは高駆動電流が得られないことや極めて高度に制御された条件が要求される。

SiC においては広いバンドギャップに起因して、電流を取り出す電極金属との間にショットキー障壁が生じ、低抵抗なオーミックコンタクトの形成が極めて難しいという課題がある。その解決として、ニッケル (Ni) を堆積した後に 1000°C 程度の高温熱処理を行い、NiSi 合金を電極と SiC の界面に形成する方法がとられている。しかし、界面反応として SiC から Ni 側へ Si が移動し、また、炭素が界面に偏析する。これは電極の高抵抗化や剥離を引き起こし、信頼性が低い。また、高いプロセス温度に起因して Al や Cu、Au などの高電導度を持つ金属材料を用いることができず、デバイス作製における電極材料の選択制が極めて狭いという問題点があり、不純物原子の拡散や高温処理に耐える材料やプロセスのみが利用可能であるという課題が挙げられる。

このように Ge や SiC におけるデバイス作製工程では低温かつ高度な制御や、高温工程が要求されている。

これらの課題に対し研究代表者は、電極金属のシリサイド化を用いず、低温でオーミック電極を形成する「a-Si 欠陥制御型ヘテロジャンクション電極」の研究を進めてきた。この方法は低温で非晶質 Si (a-Si) を Ge 上に堆積し、a-Si 層の膜中欠陥量と結晶性をレーザによる短時間加熱により制御し、この a-Si 層を電極層として用いることで、通常は整流性を示す Al 電極と n 型 Ge の間でオーミック特性を実現する(研究業績 1) (図 1)。本方式は従来の手法に比べて次のような特徴を有している。(1)金属/Ge 界面の課題を金属/a-Si ヘテロジャンクション電極界面の関わりに落とし込み、豊富な知見がある Si と電極金属の接触として考えることができ、厚膜の形成が可能である。(2)最高プロセス温度が低温であり、処理時間も短くなる。オーミック接触形成処理による電極劣化を低減することができる。(3)膜中欠陥量と結晶性の制御により伝導度の制御が可能となる。膜中の欠陥量を制御することで欠陥ポテンシャルの制御を行い、a-Si 層のバンドエネルギー位置の変調が期待できる。

### 2. 研究の目的

この提案方式を SiC に応用すれば、デバイス性能に利点がある Cu 等の低融点・高導電率材料を電極として用いることができ、より高効率・省エネルギーデバイスの作製が可能となる。しかし、本方式の詳細な原理はまだ明らかになっておらず、SiC への適用可能性についても更なる研究を要する。そこで、本研究では欠陥制御型ヘテロジャンクション電極の原理解明を進めるとともに、SiC への応用基盤を確立することを目的とする。

### 3. 研究の方法

上記をもとに、本研究では a-Si 層の欠陥制御量と半導体のポテンシャルエネルギーの関係について基礎的研究を行い、オーミック特性取得の原理解明を試みた。そして金属電極/a-Si ヘテロジャンクション電極/半導体の構造を利用した応用範囲の広いオーミック電極形成技術の確立を目的に、SiC への適用を試みた。

#### 研究期間内の研究実施内容

(1) a-Si ヘテロジャンクション形成と低温化  
a-Si ヘテロジャンクション電極の形成にスパッタリング法を導入し更なる低温化を図る。SiC 基板上に形成し、従来法と比較を行う。また、a-Si/Ge 構造の場合に比べて a-Si/SiC 構造の場合、熱の放散が大きいことから、レーザのエネルギー吸収が異なることから、a-Si に対して効率の良い極短時間加熱法を検討する必要がある。SiC 上の a-Si 層の欠陥・結晶性制御に適した加熱方法の研究を行った。

(2)欠陥量・結晶性に起因する a-Si/SiC 層のバンドポテンシャル相対位置調査

これまでの研究で n-Ge 層に対して a-Si ヘテロジャンクション電極の有用性を示してきたが、オーミック特性取得のメカニズムについては分かっていない。a-Si 層の欠陥について依存していることは分かっていることから欠陥量と結晶性に起因したバンドエネルギーの相対位置を、バンドギャップ端と界面準位構造がわかる X 線光電子分光法 (XPS) とバンドギャップエネルギーが見積もれる分光エリプソメトリ法、より分析して、上記の寄与を明らかにする研究を行った。

(3) a-Si/SiC 構造における不純物量に依存する電気特性調査

金属/a-Si 挿入層/SiC 構造を作成し、a-Si 層の不純物量をイオン注入法により制御し、その電気特性との相関を評価した。

(4) 電子線後方散乱法を用いた結晶性評価法の開発

a-Si 層の熱処理後の結晶性に関し、電子線後方散乱法により評価を行った。その一環で、電子線散乱法を用いた新しい結晶性分布の評価手法に関して研究を行い、a-Si 層、および SiC 層の評価手法研究を行った。

4. 研究成果

(1) 提案の a-Si 挿入層を SiC 半導体に適用し、ヘテロ構造の形成方法とそのオーミック特性の調査、原理解明のためのバンドポテンシャル相対位置の調査を行った。

n 型 SiC 基板の上にプラズマ化学気相堆積 (CVD) 法を用いて不純物が  $10^{20} \text{cm}^{-3}$  の濃度で混入した a-Si 層を形成し、欠陥制御を目的とした加熱処理方法を検討し、電気特性との相関を調査した。加熱結晶化処理において従来用いていたレーザ加熱法では SiC の光吸収の低さから、十分な加熱がなされず、a-Si 層の欠陥制御ができなかった。対策として、電流注入により自己発熱するジュール加熱法を取り入れ、図 1 に示すように、十数秒のごく短時間で 1377 に達するごく短時間の加熱処理方法を開発した。

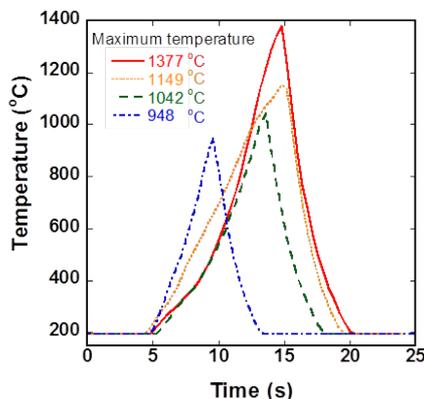


図 1 ジュール熱加熱法による温度プロファイル

ジュール熱加熱法により a-Si 層の欠陥制御を行ったところ、加熱処理の最高温度を高めることにより a-Si 層の結晶化および、オーミックコンタクトが形成できることを明らかにし、Si 層の融点に近い 1377 まで加熱した条件においては SiC に対し  $2 \times 10^{-6} \text{cm}^2$  という極めて良好なコンタクト抵抗特性を有した電極を形成することに成功した。(図 2) なお、a-Si 層の加熱処理後に Al 電極を真空蒸着法により堆積したのみであり、シリサイド化処理を行っていない。これは従来報告されている NiSi 電極とそん色のない値となっており、SiC デバイスにおける電極の剥離や炭素凝集を抑制し、デバイス特性の信頼性向上につながると考えられる結果である。また、不純物を導入しない場合もオーミックコンタクトを形成でき、バンド変調がなされていることが示唆されるが、コンタクト抵抗は 2 桁大きいことが分かった。これは高不純物濃度による低抵抗層の形成が影響していると考えている。

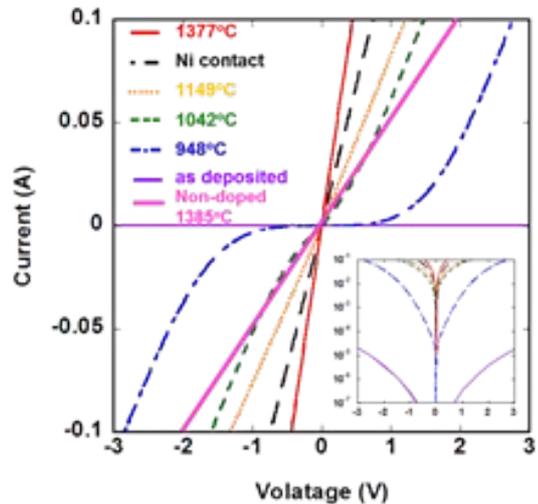


図 2 最高到達温度に対する抵抗値の変化

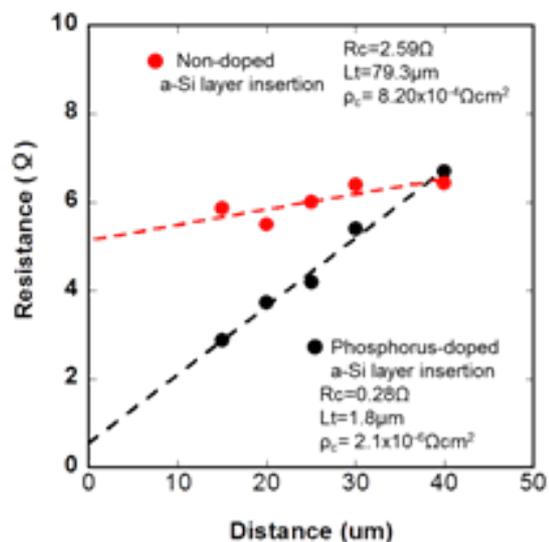


図 3 提案法によるコンタクト特性の比較

また、スパッタリング法を用いて形成した高不純物濃度の a-Si 挿入層を有するサンプルにおいても同様に良好なオーミック特性を取得しており、危険ガスを用いず、低温形成法であるスパッタリングプロセスによる環境軽負荷型の SiC コンタクト形成法を実証した。

### (2) XPS によるメカニズムの解明

さらに、動作原理解明のため XPS を用いて価電子帯オフセットの評価を行った。その結果、図 4 に示したように Si 層と SiC 層の間で価電子帯エネルギーの立ち上がりが理論値の 1.26eV から 1.9eV に増大していることが分かった。このことから伝導帯オフセットが 0.85eV から 0.21eV と大きく低減されていることを示しており、欠陥制御 a-Si 層と SiC のヘテロ接合により、バンドオフセットが低減され、オーミックコンタクトが形成されたと考えられる。

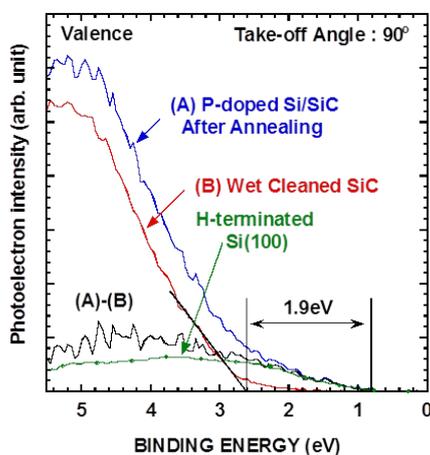


図 4 価電子帯エネルギーの立ち上がり

### (3) 不純物濃度依存性の調査

続いて、a-Si 層の不純物濃度をイオン注入法により精密に制御し、評価を行った。図 5 に示すように、不純物量に依存してオーミック特性に変化した。これは a-Si 挿入層のフェルミエネルギー変化に対してバンドオフセットが変調され、その結果、電気特性が大幅に変化していると考えられる。これは提案する欠陥制御 a-Si 挿入層のヘテロ接合によりバンドアライメント制御がなされていることを示しており、欠陥制御によるバンドエンジニアリングが可能であることを示している。

### (4) EBSD を用いた結晶性評価手法の開発

結晶化後の a-Si 層を評価する一環で、新しい結晶層の評価方法を開発した。SiC や GaN はエネルギーバンドギャップが大きく、その大きいエネルギーバンドギャップに起因して光の吸収が極めて少ない。一般的な評価用光源では基板の深い部分まで評価レーザー光が到達し、電子デバイスとして構造化したときに重要な基板表面近傍に形成される不純

物注入領域の評価を困難にする。従って表面近傍の評価には浅い光侵入深さの波長 244nm 以下の DUV 光レーザーを用いたシステムが必要となる。また、透過型電子顕微鏡は非常に微小領域のみの評価で、デバイススケールに結晶性分布評価は困難である。そこで、走査型電子顕微鏡 (SEM: Scanning electron microscope) に搭載した電子線後方散乱 (EBSD: Electron back-scattering) 分析装置を用いて発生する菊池線パターンの明瞭さを評価することで表面近傍の結晶性評価と分布評価が可能であると着想し、研究を進めた。EBSD 法で評価する菊池線パターンの明瞭さ (IQ 値) が結晶の均一性に相関することに着目した。a-Si 層、およびイオン注入した SiC それぞれに対し、再結晶化したサンプルに対して提案法で評価したところ、ラマン散乱分光測定では検出できていない電気特性に強く相関する結晶性の回復を示すデータが得られた。これは光学測定では追従できない結晶性の変化を数値的に捉え、デバイス評価において重要な領域を調査可能とする。(図 6, 7)

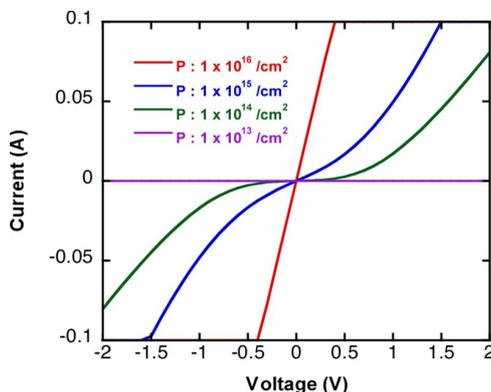


図 5 不純物濃度に対する電流電圧特性

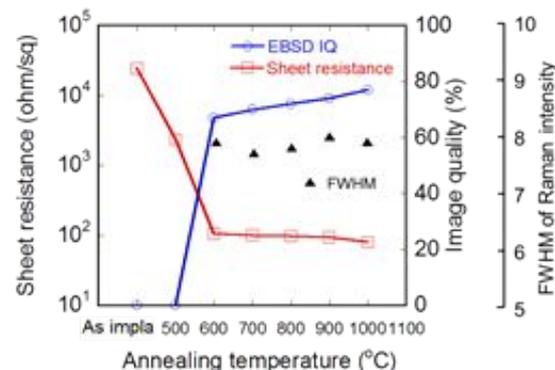


図 6 a-Si 層の活性化熱処理に対するシート抵抗とラマン分光法による FWHM および、IQ 値

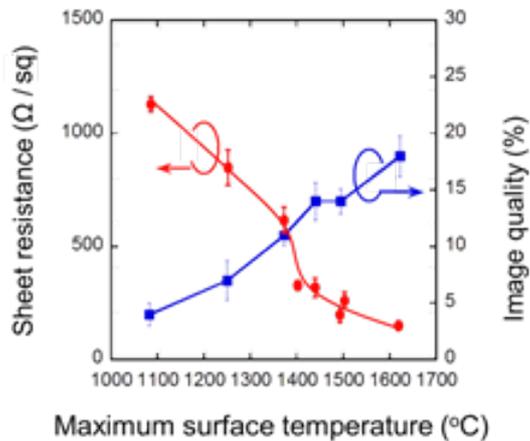


図7 SiCにおける活性化熱処理温度に対するシート抵抗とIQ値

研究機関を通じ、a-Si 挿入層上に形成したアルミニウム金属のシリサイド化を行わずに  $2 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-2}$  という実用に耐えうるコンタクト抵抗を実現した。これはSiCデバイスにおける課題であった炭素凝集や電極剥離を抑制し、信頼性や特性向上が期待される。

また、EBSD法を用いた新しい結晶性評価手法により種々の結晶材料に関する光学的評価手法と透過型電子顕微鏡の極微細領域測定手法を補完する新しい結晶評価手法が実現し、これまでに成しえなかった電気特性に相関するサブ原子レベルの回折情報を基にしたナノメートル領域の面内結晶性分布評価法として新しい研究分野の開拓がなされる。

## 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 2 件)

1. Hiroaki Hanafusa, Keisuke Maruyama, Shohei Hayashi, and Seiichiro Higashi, "Estimation of Phosphorus-implanted 4H-SiC Layer Recrystallization by EBSD Pattern Analysis", *Mat. Sci. Forum*, **821**, 391-394 (2015). (査読あり)

DOI:10.4025/www.scientific.net/MSF.821.823.391

2. Hiroaki Hanafusa, Akio Ohta, Ryuhei Ashihara, Keisuke Maruyama, Tsubasa Mizuno, Shohei Hayashi, Hideki Murakami, and Seiichiro Higashi, "Properties of Al Ohmic contacts to n-type 4H-SiC employing a Phosphorus-Doped and Crystallized Amorphous-Silicon Interlayer". *Mater. Sci. Forum.*, **Vol 778**, pp.649-652 (2014). (査読あり)

DOI:10.4028/www.cscientific.net/MSF.778-780.649

〔学会発表〕(計 4 件)

1. H. Hanafusa, K. Maruyama, S. Hayashi, S. Higashi, "Estimation of Phosphorus-implanted 4H-SiC Layer Activation by EBSD pattern analysis," 10th European Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ECSCRM2014), (Sept. 21-25, 2014, Grenoble, France)

2. 花房宏明, 丸山佳祐, 林 将平, 東清一郎, "EBSD パターン明瞭度を用いたリン注入 4H-SiC 層の結晶性評価", 第 75 回 応用物理学学会学術講演会 講演予稿集 19a-PB5-5 (2014.9.17-20, 北海道札幌市 北海道大学札幌キャンパス)。

3. 廣松志隆, 花房宏明, 丸山佳祐, 石丸凌輔, 東清一郎, "Si 挿入層の不純物濃度に依存した 4H-SiC のコンタクト特性", 2014 年度 応用物理・物理系学会中国四国支部 合同学術講演会 (Da-6) P.59. (2014.7.26, 島根県 松江市 島根大学)。

4. H. Hanafusa, A. Ohta, R. Ashihara, K. Maruyama, T. Mizuno, S. Hayashi, H. Murakami, and S. Higashi, "Contact Property of 4H-SiC with Phosphorus-Doped and Crystallized Amorphous-Silicon Insertion Layer," *Tech. Dig. The International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2013 (ICSCRM2013)*, (Sept. 29-Oct. 4, 2013 Miyazaki, Japan.)

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

花房 宏明 (HANAFUSA HIROAKI)

広島大学・大学院先端物質科学研究科・助教  
研究者番号：70630763