

# 硬 X 線光電子分光解析による金属/Silicon-cap annealed SiC 接合の バンドアライメント評価

## Evaluation of Band-alignment on Metal/Silicon-cap Annealed SiC Interface by Hard-X-ray Photoelectron Spectroscopy

花房 宏明<sup>a</sup>, 岩室 憲幸<sup>b</sup>, 木村 浩<sup>c</sup>  
Hiroaki Hanafusa<sup>a</sup>, Noriyuki Iwamuro<sup>b</sup>, Hiroshi Kimura<sup>c</sup>

<sup>a</sup>広島大学, <sup>b</sup>筑波大学, <sup>c</sup>富士電機(株)  
<sup>a</sup>Hiroshima University, <sup>b</sup>University of Tsukuba, <sup>c</sup>Fuji Electric Corp.

本研究では我々が提案している金属/Si/SiC 構造を用いたオーミックコンタクト形成に関してそのメカニズム解明を目的に金属を蒸着した状態で SiC バルクウエハと SiCA 処理サンプルに対し、硬 X 線光電子分光測定 of 角度分解評価を行い、SiC 表面のバンド構造の推定を行った。SiCA 処理された SiC 表面では多量の電子が誘起され、オーミックコンタクトが形成されていると考えられること、また、金属の仕事関数に依存した Si1s 内殻軌道のシフトが得られた。

**キーワード：** 炭化ケイ素、オーミックコンタクト、硬 X 線光電子分光、バンドアライメント

### 背景と研究目的：

省エネルギーで高効率なパワーデバイスを実現すべく次世代材料として研究が進められている SiC (炭化ケイ素) 半導体は鉄道などのパワーモジュールに採用され、製品化が進められている。しかしながら、材料が持つ優れたポテンシャルがすべて引き出されているとは言えない。その要因の一つとして、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を形成することが極めて難しいという課題がある。一般的には、ニッケル(Ni)などの金属を堆積した後に 1000°C 程度の高温熱処理を行い形成されるシリサイド合金を電極と SiC の界面に挿入する方法がとられている。しかし、界面反応として SiC から金属側へ Si が移動し、また、炭素が界面に偏析する。これらは電極の高抵抗化や剥離を引き起こし、信頼性を低くする。炭素偏析層の除去プロセス導入や配線金属とコンタクト金属を別に形成する方法が取り入れられている。しかし、そのシリサイド化プロセスは高い熱処理温度に起因して前工程で形成されている金属-酸化物-半導体(MOS)トランジスタにおける酸化膜層の劣化を引き起こす。これらことから、「高温シリサイド化熱処理を低温化、もしくは無くす」ことが可能となれば、製品として非常に重要な信頼性の大幅な向上が期待でき、さらには、SiC トランジスタの物性値を引き出すにあたってボトルネックである酸化膜界面特性の向上が期待できる産業上極めて重要な技術となりうる。また、SiC デバイスのみならず、多くの電子デバイス作製プロセスにおける新しい基盤手法となる可能性を有している。

上記したシリサイド化に伴う電極形成の課題に対し、申請者は高不純物濃度 Si 層を電極金属と SiC の間に挿入することで、金属と SiC 間の実質的なバンドオフセットを低減する手法を独自に提案し、研究を推進してきた[1-3]。本提案法はアモルファス状態で Si 中に不純

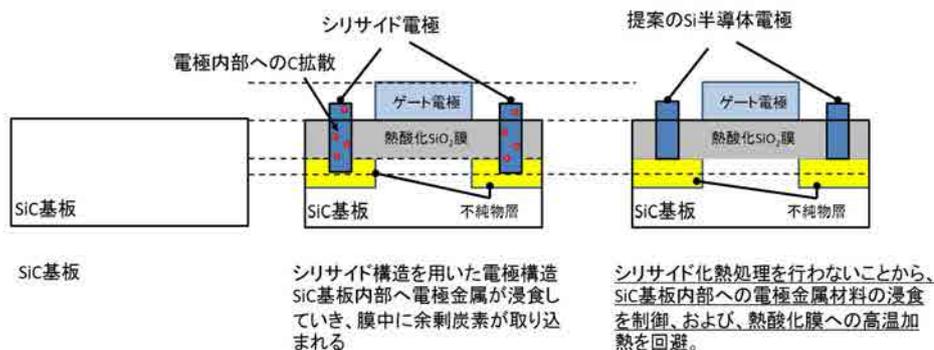


図 1. 従来法と提案法の違い

物を導入し、その後、短時間の熱処理で結晶化すること(シリコンキャップアニール：SiCA)で通常の結晶成長法では成し得ない高濃度の不純物を導入した Si 層を電極金属と SiC の間に挿入し、金属とショットキー障壁が形成される界面を Si 層に変えるとともに、SiC に対する実質的なポテンシャル障壁を低減する技術である。(図 1 に従来法と提案法の違いを記載)

SiCA により n 型 SiC においてオーミックコンタクトが形成される要因を明らかにするべく、Spring8 一般課題(課題番号: 2017A1762)にて採択された研究において角度分解硬 X 線光電子分光測定を行った結果、SiCA 処理された SiC 表面の伝導帯エネルギー位置がフェルミレベルよりも高いエネルギー状態となっており、そのことによりオーミック特性が得られていると結論付けた。しかしながら、金属を接合した場合の電子状態が明らかになっておらず、実際のオーミックコンタクトになっている状態が反映されていない。また、仕事関数が具体的に既知の金属を形成した場合の検討も行えておらず、これらのことからオーミックコンタクトが形成出来る真の要因を明らかにするバンドアライメントの総合的な状態評価ができていない。電極金属の仕事関数の違いによるアライメント評価を行うことで SiCA 処理により形成される表面層の変調、つまり接合前の状態を明らかにすることが期待できる。従い、本申請では SiCA 処理の効果と電極金属の仕事関数依存性を硬 X 線電子分光測定により評価することで、バンドアライメントの見地からなぜシリサイド化熱処理を行わずともオーミックコンタクトが形成されるのかを明らかにする。

### 実験：

本研究で提案している金属/Si/SiC 構造を用いたオーミックコンタクト形成に関してそのメカニズム解明を目的とした提案構造のバンドアライメントを決定する為、SiC バルクウエハ、SiCA 処理サンプル、SiCA 後に Si 層を除去した SiC ウエハおよび、および仕事関数の異なる Au, Ag, Ni, Al を薄く真空蒸着したサンプルを用意した。サンプルは 5 mm×10 mm で厚さ 300 μm のプレート形状で、角度分解測定により評価領域の組成ずれが無いよう全面で同じ処理を行ったサンプルを用意した。ビームラインは BL46XU を利用し、VG SCIENTA 社製 R4000 を用いて HAXPES 測定を行った。Au にてエネルギーの較正を行い、パスエネルギー 200 eV とした。光電子検出角度 (TOA) はそれぞれ 10, 15, 20, 30, 80° とし、角度が浅くなるに従い、スイープ回数を増やして測定を行った。また、中和銃は使用しなかった。それぞれ、Si2p、Si1s、C1s 軌道をそれぞれの TOA にて測定した。

### 結果および考察：

まず、金属電極が蒸着されていないサンプルについて評価を行った。光電子の脱出深さ (TOA) が最も深い 80° の条件における SiC ウエハと SiCA 処理の前後、および SiCA 処理後に Si 層を除去したサンプルから得られた Si1s 軌道の光電子スペクトルを図 2 に示す。SiCA 処理を行ったサンプルからは Si と SiC それぞれの層から検出されたと考えられる Si1s 軌道の光電子信号が得られた。これは SiCA 処理により Si 層が凝集し、ドット化したことによりドットの間部分において SiC 表面が露出したため、SiC 層からも光電子が脱出可能となったと考えられる。また、Si 層を除去したサンプルでは Si 層に起因するのピークは検出されなかった。このことから Si 層はほぼ完全に除去されていると考えられる。SiC ウエハのスペクトルと比較して SiCA 処理を行ったサンプルではピーク位置が 0.63 eV 高束縛エネルギー側にシフトしている。また、Si 層を除去した場合においてもピークのシフトはおおよそ維持されており、SiC 層表面が SiCA により変調されていることが示唆される。これは Si 層を除去した場合もオーミック特性が得られていることと良く整合する。

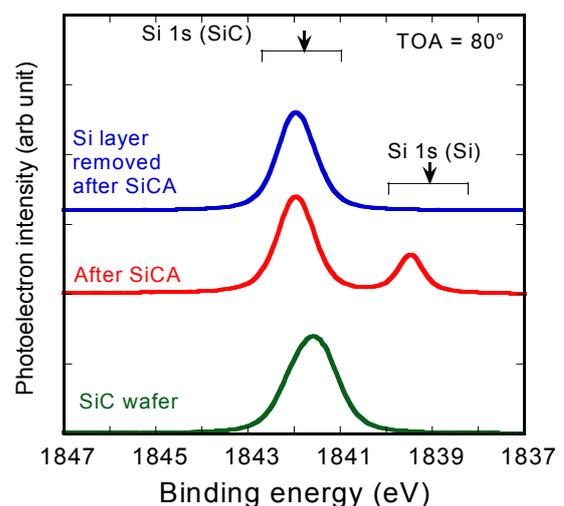


図 2. SiC ウエハ、SiCA 処理後の Si/SiC 構造、及び SiCA 処理後に Si 層を除去したサンプルから得られた Si1s 軌道のスペクトル

SiC ウェハ、および SiCA 処理したサンプルと SiCA 処理後に Si 層を除去したサンプルから取得した TOA から換算した検出深さに対する Si1s 軌道のピーク位置をプロットした結果を図 3 に示す。また、各金属層を堆積した状態で TOA= 80°にて取得したピーク位置を図中にそれぞれ示す。SiC ウェハに比べて SiCA 処理したサンプルと SiCA 後にシリコン層を除去したサンプルにおいては表面近傍においてもそれぞれ 0.5 eV と 0.67 eV シフトしており、TOA= 80°で得られたピーク位置の差がおおよそそのまま維持されている。高結合エネルギー側へのピークシフトは Si1s 軌道の結合エネルギーがフェルミエネルギーから離れることを意味する。SiC のバンドギャップが SiCA 処理後も同じであると仮定した場合、Si1s 軌道エネルギーシフト量は価電子帯および伝導帯のシフト量と同じであることから HAXPES の検出深さであるおおよそ表面から 15 nm 程度の範囲で SiC 表面近傍の伝導帯エネルギーが SiC 基板よりもおおよそ 0.63 ~ 0.67 eV 高くなっていることが示唆される。すなわち、SiCA 処理された SiC 表面では多量の電子が伝導帯端に存在することが推測され、このことからオーミック特性が得られていると考えられる。

さらに、金属層を堆積した状態で得られたピーク位置はバルクウェハに対して高束縛エネルギー側位置し、電極金属の仕事関数に依存したシフトが得られた。このことから、電極金属を変えることで伝導帯エネルギーのコントロールが期待できる。

HAXPES 分析により電極金属のシリサイド化を行わずにオーミック特性が得られる SiCA 処理された SiC 表面近傍のバンド構造を評価した。SiCA 処理により、SiC に起因する Si1s 光電子スペクトルピークが高束縛エネルギー側におおよそ 0.67 eV シフトすることが分かった。また、Si 層を除去した場合においてもシフト量は少なくなるものの依然として大きくシフトしていることが示された。さらに、測定結果をもとに伝導帯エネルギーの状態を見積もったところ、SiCA 処理したサンプルにおいては SiC 表面近傍において伝導帯エネルギーがフェルミエネルギーよりも高くなっていることが示唆され、このことから表面近傍の多量の電子により、オーミック特性が得られたと考えられる。

#### 参考文献：

- [1] 谷口 太一、花房 宏明、東 清一郎、第 64 回応用物理学会春季学術講演会 15p-F204-8 (2017.3.14-17、パシフィコ横浜)。
- [2] 谷口 太一、花房 宏明、東 清一郎、先進パワー半導体分科会 第 3 回講演会 P-84 (pp. 212-213) (2016.11.8-11.9、つくば国際会議場)。
- [3] H. Hanafusa, A. Ohta, R. Ashihara, K. Maruyama, T. Mizuno, S. Hayashi, H. Murakami, and S. Higashi, Mater. Sci. Forum., Vol 778-780, pp.649-652 (2014).

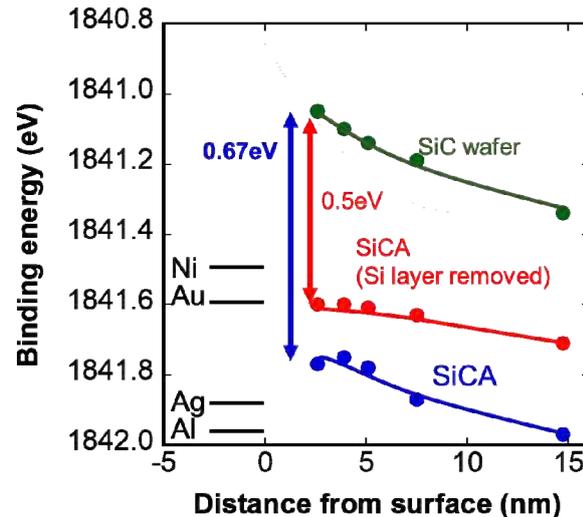


図 3. SiC ウェハ、SiCA 処理後の Si/SiC 構造、及び SiCA 処理後に Si 層を除去したサンプルにおける Si1s 軌道スペクトルのピーク位置の深さ方向依存性、および金属層を堆積した場合のピーク位置