



# 軟 X 線光電子分光による Si 中にドーピングした不純物の化学結合状態と活性化状態の評価

筒井一生<sup>1</sup>、名取鼓太郎<sup>1</sup>、小川達博<sup>1</sup>、星井拓也<sup>1</sup>、  
<sup>1</sup>東京工業大学

キーワード：半導体，ドーピング，シリコン(Si)，アンチモン(Sb)，リン(P)，電氣的活性化

## 1. 背景と研究目的

半導体 Si にドーピングした不純物を電氣的に活性化させる濃度には上限がある。その制御技術の開発を最終目的として、光電子分光と光電子ホログラフィーによる不純物原子の Si 結晶中での原子レベルの構造評価を進めている[1]。今回は、これまでデータの蓄積が殆ど無かったアンチモン(Sb)とリン(P)のドーパントに対して、Si 中での化学結合状態を軟 X 線光電子分光で分析した。

## 2. 実験内容

Si(100)ウエハに 3keV で Sb を  $1.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  あるいは P を  $1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  注入した後に、1050 °C のスパイク RTA (rapid thermal annealing) で活性化させた。それぞれの不純物濃度プロファイル (SIMS 測定) を Fig.1 に示す。これらのウエハに、オゾン雰囲気での表面酸化と形成された酸化膜のエッチングを繰り返すステップエッチング法で、表面から 25 nm 程度まで段階的にエッチングした試料を準備し、BL7U の光電子分光システムを用いて内殻光電子スペクトルを測定した (入射光子エネルギーは 500 eV)。

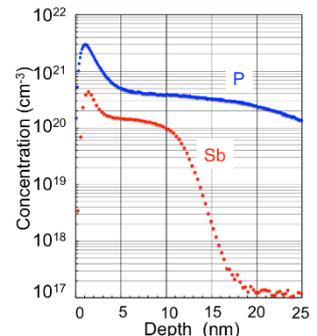


Fig.1 Sb および P の濃度分布

## 3. 結果および考察

Sb ドーピングでは、エッチング深さ 1 nm と 10 nm で得られた Sb 4d スペクトルを Fig.2 に示す。高結合エネルギー側から BEH, BEM, BEL とラベル付けした 3 種類の異なる状態の Sb が存在することがわかった。これは、先行評価されている As ドーピングの場合と類似である。As では、BEH が電氣的に活性、BEM と BEL はいずれも不活性化状態と対応づけられている[1]が、Sb も同じ V 族のドナー不純物であるため、同様の対応であると推察される。これらのエッチング深さでは浅い方で Sb の全濃度が 3~5 倍高い (Fig.1 参照) が、3 種類のピーク強度比に大きな違いが無く、活性化率が同等であることがわかる。これらのスペクトル分離状況から、今後の光電子ホログラフィーによる構造解析が期待できると判断した。

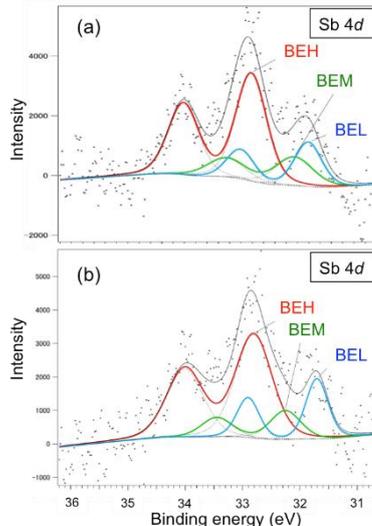


Fig.2 Sb4d 内殻光電子スペクトル。エッチング深さ：(a) 1 nm、(b) 10 nm。

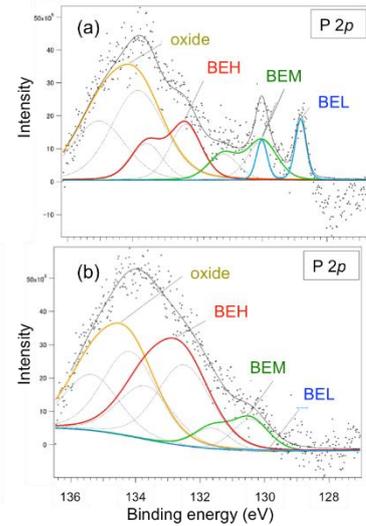


Fig.3 P2p 内殻光電子スペクトル。エッチング深さ：(a) 1 nm、(b) 25 nm。

P ドーピングの 1 nm と 25 nm エッチングに対して得られた P2p スペクトルを同様に Fig.3 に示す。同じく 3 種類の結合エネルギーの異なるピークの存在が認められたが、さらに結合エネルギーの大きなピークが強く現れている。結合エネルギーの値から P の酸化物と考えられるが、同時に測定した Si2p スペクトルからは顕著な表面酸化は認められず、エッチング後の表面に P の酸化物のみが多く存在することには疑問も残る。これについては、全体のピーク分離の妥当性も含めてさらに検討中である。

## 4. 参考文献 1. K. Tsutsui et al., Nano Lett., 17, 7533, (2017).