Si にドープされた As の光電子ホログラフィーによる評価

Photoelectron holography of As doped in Si

東京工業大学 [1]，高輝度光科学研究センター[2]，奈良先端科学技術大学院大学 [3]，静岡大学 [4]
○名取鼓太郎 [1]，筒井一生 [1]，松下智裕 [2]，室隆桂之 [2]，木下豊彦 [2]，星井拓也 [1]，
角嶋邦之 [1]，若林整 [1]，松井文彦 [3]，下村勝 [4]
Tokyo Tech. [1], JASRI [2], Nara Inst. of Sci. and Technol.[3], Shizuoka Univ.[4]
°K. Natori[1], K. Tsutsui[1], T. Matsushita[2], T. Muro[2], T. Kinoshita[2], T. Hoshii[1], K. Kakushima[1],
H. Wakabayashi[1], F. Matsui[3], M. Shimomura[4]
E-mail: natori.k.ab@m.titech.ac.jp

[はじめに]　Si-CMOS デバイスでは、微細化に伴って高濃度かつ極浅の接合形成が求められるが、活性化した不純物の濃度に上限があり、過剰濃度の不純物はクラスター化するなどによりキャリア供給には寄与しないと考えられている。結晶内の不純物の原子レベルでの挙動解明はこれらの限界打破につながる基礎的知見となるが、これを直接物理的に観測することは容易ではない。今回、放射光を用いた光電子ホログラフィー技術[1]により、Si 中の As 原子の結晶中での占有構造を描出し、電気的な活性/不活性との関連付けが可能であることを初めて示すことができた。

[実験] Si(100)ウエハに As を 3keV, 1.5×10^{15}cm^{-2} でイオン注入し、1000℃のスパイク RTA（高速（短時間）熱処理）で活性化した後に、さらに活性化率を高める目的で 1050℃-1 分間の RTA（ここでは PA: post annealing と呼ぶ）を加えた。SIMS による PA 前後の As 濃度分布を Fig.1 に示す。PA 後の試料に、常温オゾンによる酸化と希 HF による剥離を繰り返す方法で表面から約 20nm エッチングし、光電子観測面を出した。光電子ホログラフィーの実験は、SPring-8 の BL25SU で実施した。高エネルギー分解能の光電子スペクトルを、光電子検出角を二次元スキャンして取得する分析器とゴニオメータによる試料回転を組み合わせ、広角度範囲での光電子回折模様を取得した。また、同様の試料でホール効果測定により不純物の電気的活性化率を評価した。

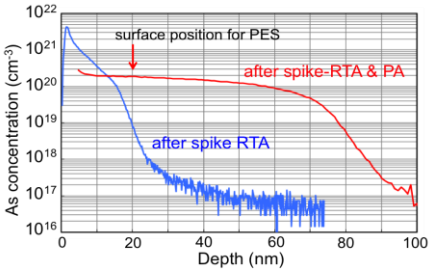

Fig.1 As profiles for before and after PA measured by SIMS.

[結果と考察]　Fig.2 に得られた As 3*d* の光電子スペクトルを示す。結合エネルギーの低いものから順に BEL, BEM, BEH とラベリングした 3 種類の異なる化学結合状態の As が検出された。光電子を角度分解測定してピーク分離することで得た、各ピーク成分の全方向（半球状)の光電子ホログラムを Fig.3 の上段に、さらにホログラフィー変換して得られた原子配列像を Fig.3 の下段に示す。

結合エネルギーが最大の BEH では、明瞭なホログラムが得られ、As 原子が Si 結晶の格子位置を置換している状態が明瞭に示された。一方、結合エネルギーが最小の BEL では明瞭なパターンは得られず、As がランダムな空間配置にあることがわかる。BEM では、BEH と同じく Si 格子置換と類似の原子配置が示唆されたが単純な格子置換とは異なる構造要素も含まれていることが推測される。

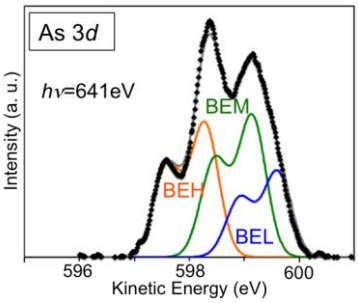

Fig.2 As 3*d* spectra for an etched sample after PA.

同一の PA 後のエッチング前試料でホール効果測定によりシートキャリア濃度を測定した。SIMS プロファイルから算出した As のシート濃度との比較から、全体の活性化率が約 80%と評価された。Fig.1 に示すように PA 後のプロファイルは比較的平坦であるため、光電子測定面でも同程度の値と考えられる。一方、Fig.2 の各分離ピークの相対強度は、BEH:37%、BEM:39%、BEL:24%である。BEH の As が活性化状態にあると考えられるが、これだけでは供給されているキャリア濃度に足りておらず、例えば類似構造をもつ BEM の As も活性化してキャリアを放出している可能性も考えられる。これについては、定量評価の精度を高めつつ、原子配列構造との関係でさらに議論を進めて行く。

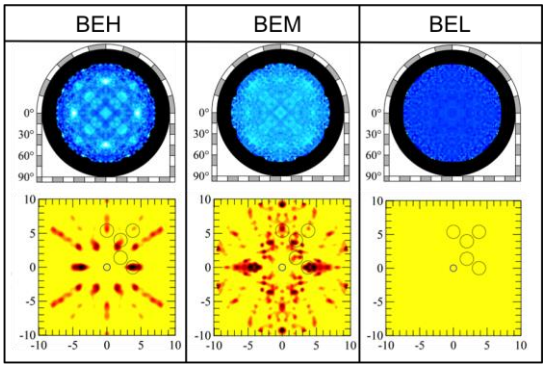

Fig.3 Photoelectron holograms and atomic arrangements generated from As 3*d* spectra.

謝辞：本研究は科研費新学術領域研究「3D 活性サイト科学」26105014 の助成を受けた。

参考文献 [1] 大門寛, 応用物理, vol.85(1)、21, (2016).

© 2016年 応用物理学会