

高分解能硬X線光電子分光と軟X線光電子分光による次世代半導体プロセス用極浅プラズマ・ドーピング層の化学結合状態の評価

Photoelectron spectroscopy study on chemical binding states of ultra-shallow plasma-doped silicon layer by using hard X-ray and soft X-ray for the application of advanced ULSI devices

金 成国¹, 岡下 勝己¹, 佐々木 雄一朗¹, 伊藤 裕之¹, 水野 文二¹, 松田 徹², 野平 博司²,
筒井 一生³, 角嶋 邦之³, 岩井 洋³, 小島 雅明⁴, 池永 英司⁴, 金 正鎮⁴, 小林 啓介⁴, 服部 健雄²,
*C. G. Jin¹, K. Okashita¹, Y. Sasaki¹, H. Ito¹, B. Mizuno¹, T. Matsuda², H. Nohira², K. Tsutsui³,
K. Kakushima³, H. Iwai³, M. Kobata⁴, E. Ikenaga⁴, J. J. Kim⁴, and K. Kobayashi⁴, T. Hattori²

¹株式会社 ユー・ジェー・ティー・ラボ, ²武蔵工業大学, ³東京工業大学, ⁴高輝度光科学研究センター

1.背景と研究目的

半導体集積回路 (LSI) の微細化が進展した結果、トランジスタのソースおよびドレインの接合深さは極めて浅くなり、2010年付近に想定される32 nm世代では、エクステンション部の接合深さを10 nm以下にすることが要求されている。このような浅い接合深さは、これまで用いられてきたイオン注入法ではイオンビーム電流が極度に低下するために実現することはできない。実験責任者の上司である水野文二は、1987年に世界に先駆けて、プラズマ法によりシリコン基板極表面に高濃度のボロンを注入する技術を提唱し、その技術開発に努めてきた。その結果、現在では接合深さ10 nm以下の領域に 10^{15} ions/cm²オーダーのボロンを注入する技術の開発に成功している。また、接合の極浅化を達成するにはドーピング後の不純物をあまり拡散させずに活性化する技術も不可欠であり、そのために 10^{-3} sec以下の短時間で断熱的に熱処理する活性化プロセスがいくつか提案されている。しかし、10nm以下の薄い層にシリコンの固溶限を超えるレベルまで高濃度に注入されたボロンが、高速熱処理によってどのような化学結合を作り、どのような状態に遷移するのかということを実験的に突き止める研究は、測定自

体の難しさによって殆ど成されていない。そのため、プラズマ・ドーピングによって浅い注入を実現しても、それをいかに効率良く活性化するかという試みは正に暗中模索であり、明確な方法論をもってプロセスを最適化することは不可能であった。SPring-8の硬X線および軟X線を用いた光電子分光 (PES) 測定は従来のPESでは検出できない領域をカバーすることができ、更にその両者を組み合わせることによってシリコン中にドーピングされたボロンの化学的状態を明確に把握できることがこれまでの実験で分かって来た。現在に至るまでナノメートル・オーダーの極浅接合に関する化学結合状態の評価法は他には存在せず、この方法が確立すれば更に微細化が進められてゆくLSIデバイス開発の進展に資するところ非常に大である。

先ずSPring-8のBL47XUを用いた高分解能硬X線PES装置は励起X線のエネルギーが6keV~10 keVと非常に高いため、Si 1sスペクトルの検出深さが約10nmとなって丁度我々の作製する極浅ジャンクション領域のSiの結合状態を見ることが出来る。N型Si基板に不純物ボロンをドーピングし、熱処理によって活性化するとキャリアが発生し、その結果フェルミ準位がバンドギャップ内でシフトする。こ

の時 Si 1s の結合エネルギーもフェルミ準位のシフトに従って変化する。従って、Si 1s の結合エネルギーのシフトを測定することで結合状態とキャリア密度を評価することが出来る。また、Si 1s のスペクトルの形状（半値幅、対称性等）も導入される不純物の種類や導入法、アニールの方法によって異なる。このことから、Si 1s の結合エネルギーの変化とスペクトル形状の変化を測定することで、極浅プラズマ・ドーピングと高速熱処理プロセスがシリコンの化学結合状態をどのように変化させるかを評価することが出来る。

次に SPring-8 の BL27SU に於ける軟 X 線 PES 装置では最表面領域のボロン (B) の結合状態を見る事が出来る。通常の X 線光電子分光分析器において励起源として用いる Al K α では B 1s 内殻準位の光イオン化断面積が極めて小さいためにボロンの検出が極めて困難であった。しかし、BL27SU の光子・エネルギー 500 eV により励起した B 1s 光電子スペクトルでは光イオン化断面積が大きく、かつ高輝度の放射光が得られるため、シリコン基板最表面近傍の活性化されたボロンの分布を明らかにすることが出来る。つまり、この両測定の間合わせによって Si と B 双方の位置的、物性的な情報が得られることになり、従来では望めなかったドーピングと熱処理プロセスの最適化を効率的に進めることが可能になる。

2. 実験

n-型 8 インチ Si ウェハ (10 Ω cm) をプラズマドーピングチャンバーに入れ、He で希釈された B₂H₆ ガスを導入し、ヘリコン波プラズマを発生させ外部 DC バイアス電圧で Si ウェハにドーピングした。Spike RTA のピーク温度は 1075°C である。B 1s スペクトルは SPring-8 の BL27SU の軟 X 線光電子分光装置を使い光子・エネルギー 500 eV で測定した。

3. 結果及び考察

図 1 に、熱処理前及び熱処理後の光電子の脱出角 80°において測定した B 1s スペクトルをエッチング回数をパラメータとして示す。

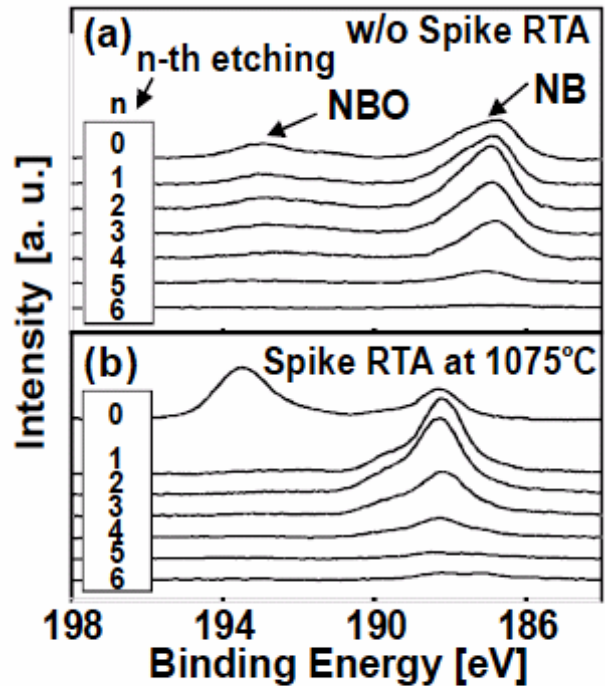


Fig. 1 B 1s spectra
(a) w/o Spike RTA, (b) w Spike RTA

この図において、1) 酸化していないボロンのスペクトル (NB) が SpikeRTA により変化している、2) NB スペクトルと酸化したボロンのスペクトル (NBO) の結合エネルギー差 (化学シフト) の大きい成分が SpikeRTA により消失している、3) 熱処理しない試料では検出されていない化学シフトの小さいスペクトルが SpikeRTA により現れる、などが注目される。更に、B 1s スペクトルの深さ方向変化に熱処理有無による違いが見られた。

4. 結論

硬 X 線及び軟 X 線光電子分光法はプラズマドーピングサンプルのアニール前後のボロンの化学結合状態の変化を感度良く測定でき、45nm テクノロジーノード以後の半導体の不純物導入と活性化プロセスの最適化に非常に有用である。