

硬 X 線光電子分光法による極浅接合シリコンのバンドプロファイル評価 Energy band profile of ultra-shallow junction in silicon studied by hard x-ray photoelectron spectroscopy

吉木 昌彦^a, 土屋 義規^a, 富田 充裕^a, 池永 英司^b
Masahiko Yoshiki^a, Yoshinori Tsuchiya^a, Mitsuhiro Tomita^a, Eiji Ikenaga^b

^a(株)東芝 研究開発センター, ^b高輝度光科学研究センター
^aCorporate Research & Development Center, Toshiba Corporation, ^bJASRI

LSI の微細化に不可欠な極浅接合技術の開発に適用するため、シリコン表面のバンドプロファイルを硬 X 線光電子分光法により調べた。検出深度の大きな硬 X 線光電子分光法では、表面から接合深さまで極浅接合全体のスペクトルを得ることが可能であり、極浅接合によるバンドベンディングについてその大きさだけでなく深さも同時に評価することができる。p⁺-Si/n-Si および n⁺-Si/p-Si の極浅接合を評価した結果、バンドギャップの小さいシリコンでもベンディングを反映してピーク形状が非対称になることが分かり、バンドベンディングの深さを評価できることを確認できた。本手法は極浅接合を非破壊で評価できる方法であり、ゲート積層構造のバンド構造解析など幅広い応用が期待できる。

Hard x-ray photoelectron spectroscopy (HX-PES) was used to analyze the energy band profile of ultra-shallow junction (USJ) in silicon for advanced LSI. Large probing depth of HX-PES gives spectra including signals from whole USJ region, and allows to estimate not only magnitude but depth of the band bending caused by USJ. We measured USJs of p⁺-Si/n-Si and n⁺-Si/p-Si, and found asymmetric Si1s photoelectron peaks consisted of those from different depths and potentials. This suggests that HX-PES can provide both magnitude and depth of band bending in Si, though it has small bandgap then small band bending.

キーワード : HX-PES、バンド構造、バンドベンディング、Si、極浅接合

背景と目的: 微細化の進むLSIでは、MOSFET (電界効果型トランジスタ) のチャンネル長の減少によってソース・ドレイン間の短絡やトランジスタのしきい値電圧減少が生じる「短チャンネル効果」が顕著になるため、チャンネル長の減少に合わせてソース・ドレイン領域を薄くする極浅接合技術が必要となる。シリコン表面から10 nm以下の薄い領域に高濃度に不純物を注入・活性化させるこの極浅接合技術の開発には、深さ方向の活性化率の変化すなわちキャリア分布の評価が不可欠であるが、現在は傾斜エッチングやステップエッチングといった破壊的前処理と抵抗測定やホール測定などの電気的評価を組み合わせる方法が主流である。しかし、破壊測定で深さ分解能も不十分なため、これを補うあるいは置き換える評価法が望まれる。

本研究では、シリコン表面近傍に生じるバンドベンディングの大きさと深さが極浅接合領域のキャリア分布を反映することに着目し、硬X線光電子分光法 (HX-PES) で得たスペクトルからバンドプロファイル (深さ方向変化) を求めることにより、非破壊でキャリア分布を評価することを目的とした。我々は2005B期に同様の評価を初めてGaIn表面に適用しその有効性を確

認しているが^{1,2)}、GaIn系のみならずSi系デバイスの開発にも適用できるとなればそのインパクトは大きく、極浅接合領域の非破壊キャリア評価のほかにも、ゲート積層構造における詳細なバンド構造解析など幅広い応用が期待される。

実験: 試料にはp⁺-Siとn⁺-Siの2種類の極浅接合ウエハを用いた。それぞれ不純物としてBF₂、Asを低エネルギーでイオン注入 (1 × 10¹⁵ atoms/cm²) し、フラッシュランプアニールにより活性化したもので、SIMS (二次イオン質量分析法) により求めた注入不純物の分布深さ (@5 × 10¹⁸ atoms/cm³) は17.2 nmと12.6 nmであった。

HX-PES測定はSPring-8 BL47XUにてガンマデータシエンタ社製電子分光器R4000を用いて行った。励起X線のエネルギーは8 keV、光電子検出角度は89度とし、Auのフェルミ端から求めたエネルギー分解能は0.3 eVであった。



Fig. 1. Schematic of USJ samples.

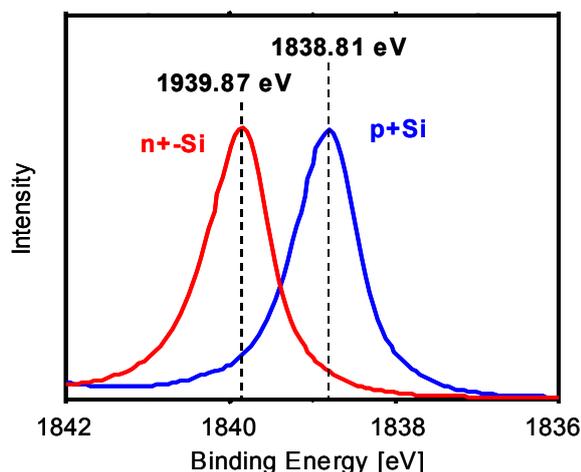


Fig. 2. Si1s photoelectron spectra of USJ p⁺-Si and n⁺-Si samples. Si1s peaks of surface oxide are outlying and very weak. The difference of peak energies originates in not chemical shift of Si, but their Fermi level shift.

結果と考察： Fig.2に各試料のSi1sスペクトルを示す。それぞれのピークはelementalなSiに由来するもので、表面のSi自然酸化層に由来するピークはさらに高エネルギー側に現れる。つまりこれらのピークはSi基板とその表面側の極浅接合層に由来するものであり、エネルギー位置の違いはSiの結合状態変化を反映するケミカルシフトによるものではなく、Si1s軌道や価電子帯上端に対するフェルミ準位のシフトと考えられる。HX-PESやXPSではスペクトルの束縛エネルギーは試料 (=電子分光器) のフェルミ準位が基準となるため、キャリアによってフェルミ準位が変動する半導体では、結合状態変化がない場合の光電子ピークのシフトからフェルミ準位の変動、すなわちキャリア濃度の変化を知ることができる。なお、エネルギー位置を変化させる要因としては試料帯電によるチャージアップシフトも考えられるが、今回の試料ではX線強度を100~25%の範囲で変化させた場合にもSi1sピーク位置は一定であり、その影響はないものと判断した。Fig.2でp⁺-Siとn⁺-Siのピーク間隔は1.06 eVとSiのバンドギャップ1.12 eVに近いことから、フェルミ準位はそれぞれ価電子帯上端、伝導帯下端付近にあり、注入された不純物は狙い通り活性化していると推定される。

Fig.3にp⁺-Si試料とn-Si基板のSi1sピーク形状の比較を示す。キャリアが少なく検出深度内でのベンディングが無視できるn-Si基板ではほぼ左右対称であるのに対し、p⁺-Siでは非対称で高エネルギー側にテールを引いていることが分かる。これはHX-PESの検出深度が接合深さよりも大きく (Si中で20 nm以上)、n-Si基板までの信号が同時に検出されるためと考えられる。つまり、Fig.4に示すようにp⁺-Si試料のバンドは表面付近で上向きにベンディングしており、HX-PES

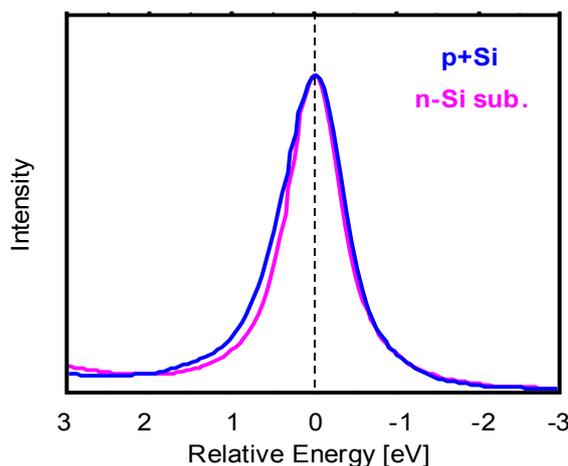


Fig. 3. Si1s photoelectron spectra of USJ p⁺-Si sample and n-Si substrate. The spectra are calibrated with peak energy as 0.0 eV and normalized with peak height.

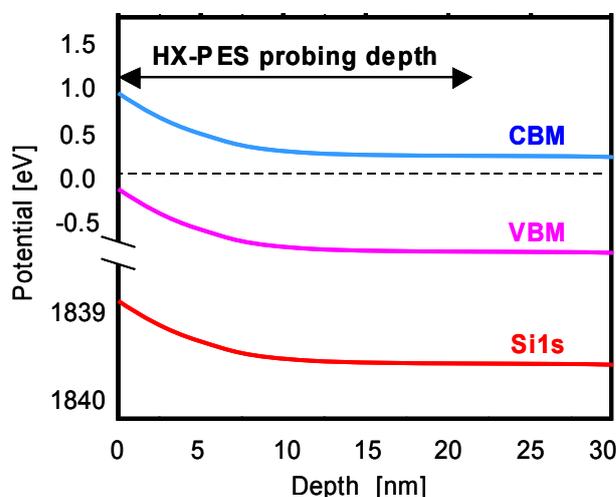


Fig. 4. Possible band diagram of USJ p⁺-Si sample. Note that the depth scale is incorrect at this time.

のスペクトルはSi1s束縛エネルギーが異なる各深さからの信号の重ね合わせとなっている。Fig.4は定性的な模式図であるが、Si1sスペクトルを一定の深さ範囲からのスペクトルに波形分離し、各深さからの検出確率を重みとして計算すると、さらにバンドベンディングの深さを定量的に求めることができる。これについては現在、解析を進めているところである。

今後の課題： SiではSi1sピーク幅に比べてSiのバンドギャップが小さいことから、バンドギャップの大きなGaNに比べると波形分離による定量解析の精度は悪くなる。実試料への応用を進める上では、HX-PES測定時のエネルギー分解能を高くするなどの改善が必要と思われる。

参考文献

- 1) M. Yoshiki et al., User Exp. Report, 2005B0807.
- 2) M. Yoshiki et al., 第 67 回応用物理学学会学術講演会(2006).