

実験責任者：金 成国、所属：株式会社 ユー・ジェー・ティ・ラボ

高分解能硬 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

**Hard X-ray photoelectron spectroscopy (HX-PES) study on chemical binding states of  
ultra-shallow plasma-doped silicon layer for the application of advanced ULSI devices**

\*金 成国<sup>1</sup>, 小畠 雅明<sup>2</sup>, 楊 科<sup>2</sup>, 孫 珍永<sup>2</sup>, 佐々木 雄一朗<sup>1</sup>, 岡下 勝己<sup>1</sup>, 中本 圭一<sup>1</sup>,  
水野 文二<sup>1</sup>, 池永 英司<sup>2</sup>, 小林 啓介<sup>2</sup>

\* C.G. Jin<sup>1</sup>, M. Kobata<sup>2</sup>, K. Yang<sup>2</sup>, J. Y. Son<sup>2</sup>, Y. Sasaki<sup>1</sup>, K. Okashita<sup>1</sup>, K. Nakamoto<sup>1</sup>,  
B. Mizuno<sup>1</sup>, E. Ikenaga<sup>2</sup>, K. Kobayashi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>株式会社 ユー・ジェー・ティ・ラボ, <sup>2</sup>財団法人 高輝度光科学研究センター

<sup>1</sup>Ultimate Junction Technologies Inc., <sup>2</sup>JASRI/SPring-8

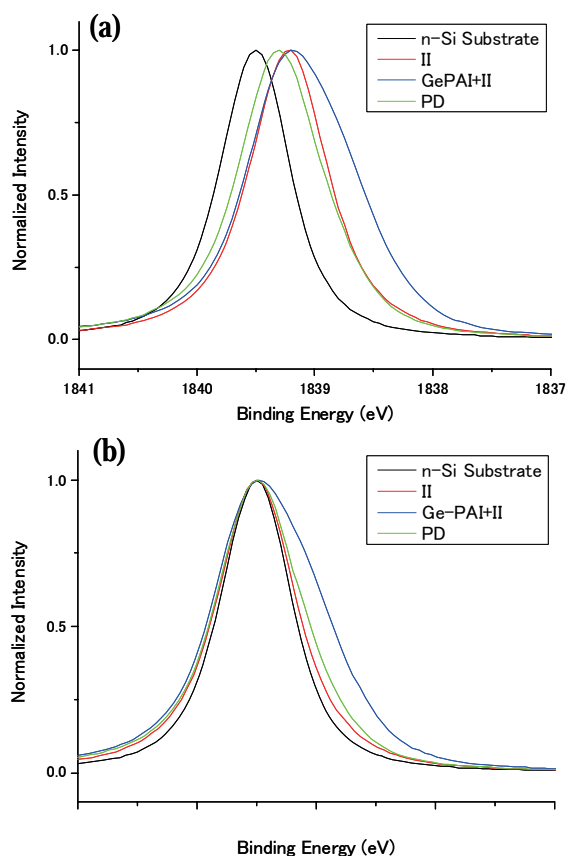
Ge プレアモルファスイオン注入 (Ge-PAI) をコンバインした極浅イオン注入サンプルの spike RTA アニール前後の硬 X 線光電子分光 (Si 1s スペクトル) を測定し、プラズマドーピング (PD) サンプルと比較した。イオン注入サンプルは、欠陥誘起キャリアトラップが低いため、PD サンプルより高いホール密度を示した。Ge-PAI 後イオン注入したサンプル (Ge-PAI+I/I) は、Si-Ge の結合により、低結合エネルギー側に強い非対称性を示した。Spike RTA アニール後、PD サンプルは Ge-PAI+I/I サンプルより不純物活性化において優位性を示した。Spike RTA アニール後、PD サンプルと Ge-PAI+I/I サンプルは共に非常に良い結晶回復を示した。

We measured HX-PES (Si 1s) of ultra low energy ion im-plantation (I/I) samples combined with Ge pre-amorphization ion implantation (Ge-PAI) before and after spike RTA, and compared it with that of plasma doping (PD) samples. As-doped I/I sample showed higher hole density compared to as-doped PD sample due to lower defect induced carrier trap. Ge-PAI+I/I sample showed strong asymmetric in lower binding energy region due to Si-Ge bonding. After spike RTA, PD sample showed superior impurity activation than that of Ge-PAI+I/I sample. Both Ge-PAI+I/I and PD sample showed excellent recrystallization after spike RTA.

**背景と研究目的:** プラズマドーピングは高いスループットを持っているので、半導体産業 45nm テクノロジーノード以後の極浅ジャンクションの作成において、低エネルギーイオン注入の代替の最有力候補として推薦されてきた[1]。我々は高い光吸収特性 (引き続き行う各種アニール技術に有効) を実現出来る He プラズマプレアモルファスをコンバインした新しいプラズマドーピング方法を開発し、spike RTA アニール、フラッシュランプアニール、レーザーアニールを用い、従来用いていた低エネルギー

イオン注入を凌駕する、低いシート抵抗を持つ極浅接合性能を実現した。なぜイオン注入よりプラズマドーピングの方が良好な電気特性を実現出来るのか?

通常の XPS と違い、SPring-8 の硬 X 線光電子分光装置[2]は、シンクロトロン光ソースから 6 keV~10 keV のフォトンエネルギーにおいて世界最高レベルの X 線フラックスを提供出来るため、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



**Fig. 1. Si 1s spectra of as-doped samples II, GePAI+II and PD compared with that of n-Si substrate : (a) peak height normalized ; (b) Peak position offset with normalized peak height.**

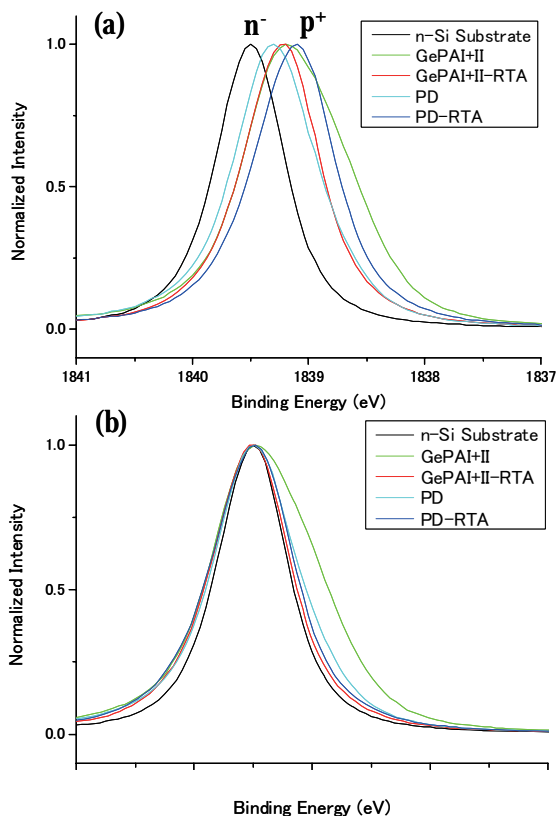
来る。前回までに、我々は、BL47XUにおいて実施した硬X線光電子分光により、10nm以下極浅プラズマドーピングとその活性化に伴ってSi 1sの結合エネルギーの変化とスペクトルの形状変化が精度良く測定出来ることが分かり、プラズマドーピングはspike RTAアニールとフラッシュランプアニール後共に非常に良い化学結合状態、即ち高い不純物活性化と結晶回復を示した[3]。本研究の目的は、イオン注入よりもプラズマドーピングの方が良好な電気特性（マクロ）を実現出来る原因を、Si 1sの化学結合状態の違いにより科学的に説明する事である。

**実験：** 今回は深さ8nmのGeプレアモルファスイオン注入(Ge-PAI)をコンバインしたイオン注入サンプル(従来技術の最新比較例)を用意し、アニール前後の化学結合状態を調べてプラズマドーピン

グサンプルと比較した。実験に用いる光電子分光装置は既にSPring-8で開発が進められている硬X線光電子分光用装置を利用した。ビームラインBL47XUの2結晶分光器のあとにチャンネルカット後置分光器を挿入して7940.1 eVの励起X線を得る。

**結果及び考察：** 図1は同じドーズ(5E 14cm<sup>-2</sup>)の三つのサンプルであるサンプル番号II(イオン注入のみ)、サンプル番号Ge-PAI+II(Ge-PAIで8nmアモルファス化してからイオン注入)、サンプル番号PD(プラズマドーピングと同時にセルフアモルファス化8nm)のアニール前のSi 1sスペクトルを示す(注入深さは共に6.3 nm)。PDサンプルの結合エネルギーはn-Si基板より約0.2 eV低い。Si 1sの結合エネルギーの変動はキャリア濃度の変動によるバンドギャップ内でのフェルミ準位のシフトを意味するので、PDによる結合エネルギーの変動の起因は、PDにより生ずる欠陥がキャリアトラップを誘起しキャリア濃度を変化させたためである。PDサンプルとintrinsic Siのフェルミ準位が共にn-Si基板より0.2 eV低いので、PD後基板の電子濃度は欠陥誘起キャリアトラップによりintrinsic Siレベルまで下がっているのが分かる。IIサンプルの結合エネルギーはPDサンプルより約0.1 eV低い。これはIIサンプルのホール密度がPDサンプルより高いことを意味する。IIサンプルはPDサンプルよりドーズレートが低いため、低い欠陥誘起キャリアトラップと高いホール密度になったと考えられる。IIサンプルとPDサンプルと比べて、サンプルGe-PAI+IIのスペクトルの低結合エネルギー領域でのピークの非対称性が大幅に増加した。Ge-PAIによるピーク形状の大幅の非対称化は、Ge-Siの結合に由来すると考えられる。

図2にGe-PAI+IIサンプルとPDサンプルのspike RTA後のSi 1sスペクトルを示す。Spike RTA後のシート抵抗はそれぞれ733 ohm/sq.と739 ohm/sq.である。Spike RTA後、PDサンプルの結合エネルギーはGe-PAI+IIサンプルより低い。これはPDサンプルのホール密度がGe-PAI+IIサンプルより高い、即ちPDサンプルの不純物活性化が



**Fig. 2. Si 1s spectra of samples GePAI+II and PD before and after spike RTA: (a) peak height normalized ; (b) peak position offset with normalized peak height.**

Ge-PAI+II サンプルより優れていることを意味する。なお、spike RTA 後 PD サンプルと Ge-PAI+II サンプルの半値幅は共に n-Si 基板レベルに戻った。これは spike RTA 後 PD サンプルと Ge-PAI+II サンプルが共に非常に良い結晶回復をしたことを示す。

**結論：** 深さ 8nm の Ge プレアモルファスイオン注入をコンバインした極浅イオン注入試料（注入深さ：6.3 nm）におけるボロンの化学結合状態に關す

るデータが初めて得られ、プラズマドーピング試料との比較ができた。アニール前の as-doped 状態と比較した場合、イオン注入サンプルは、欠陥誘起キャリアトラップが低いため、PD サンプルより高いホール密度を示した。Ge-PAI 後イオン注入したサンプル (Ge-PAI+I/I) は、Si-Ge の結合により、低結合エネルギー側に強い非対称性を示した。Spike RTA アニール後、PD サンプルは Ge-PAI+I/I サンプルより、不純物活性化において優位性を示した。Spike RTA アニール後、PD サンプルと Ge-PAI+I/I サンプルは共に非常に良い結晶回復を示した。硬 X 線光電子分光は接合深さが 10 nm 以下のマイクロデバイス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。

### キーワード

- ・ 硬 X 線光電子分光
- ・ プラズマドーピング
- ・ 化学結合
- ・ イオン注入

### 参考文献

- [1] A. Hori and B. Mizuno, Tech. Dig. of IEDM, (1999) p. 641.
- [2] K. Kobayashi, M. Yabashi, Y. Takata, T. Tokushima, S. Shin, K. Tamasaku, D. Miwa, T. Ishikawa, H. Nohira, T. Hattori, Y. Sugita, O. Nakatsuka, A. Sakai and S. Zaima, Appl. Phys. Lett. 83 (2003) 1005.
- [3] C.G. Jin, Y. Sasaki, K. Okashita, H. Tamura, H. Ito, B. Mizuno, T. Okumura, M. Kobata, J.J. Kim, E. Ikenaga, K. Kobayashi, International Workshop on Junction Technology (2006) p116.