

シリコン MOS トランジスタにおける電子スピン共鳴下のチャージポンピング Charge Pumping Under Spin Resonance in Si(100) Metal-Oxide-Semiconductor Transistors

静大電研 ○堀 匡寛, 小野 行徳

Shizuoka Univ., Masahiro Hori, Yukinori Ono

E-mail: hori.masahiro@shizuoka.ac.jp

チャージポンピング (CP) は、MOS のゲートに高周波電圧を印加することで界面欠陥を介した電子正孔再結合を誘導する手法であり、トランジスタの界面欠陥評価法として広く用いられている[1-3]。同手法を用いることで、界面欠陥の密度やエネルギー分布といった欠陥の電気的性質は解析できるが、一方で、磁気共鳴法を必要とする欠陥の磁氣的 (スピンの) 性質は解析できず、そのため、これまでに CP に寄与する欠陥の種類 (結合の構造) は明らかではなかった。

加えて、詳細な CP 過程についても明らかではなかった。例えば、CP における再結合過程を簡単に説明するために、1つの欠陥サイトを介して1つの電子と1つの正孔が再結合する単純なモデルが暗黙のうちに用いられているが、実際には、シリコン中のダングリングボンドは3つの状態：正に帯電したゼロ電子状態、中性の1電子状態、負に帯電した2電子状態を有することが従来の文献から広く認識されている。このため、2電子状態を反映した CP 特性が得られるものと期待されるが、その検証は十分になされていない。

これらの2つの課題を解決するために、我々はチャージポンピング法を電子スピン共鳴下[4]で行う CP-EDMR (Electrically-detected magnetic resonance)法を立ち上げてきた[5,6]。EDMR は、電子スピン共鳴をトランジスタの電流の変化から検出する手法であり、電流経路にある電子スピンのみを選択的に高感度で検出できる。ここでは特に、界面欠陥を介した再結合 (CP) 電流 I_{CP} をモニターし、その微小変化 ΔI_{CP} ($\Delta I_{CP}/I_{CP} \sim 10^{-5}$) を検出する。本測定では、シリコン(100)面上に作製された N 型チャンネル MOSFET (欠陥密度は 10^{11}cm^{-2}) を用い、これを電子スピン共鳴装置 (X バンド, 10GHz) へ挿入し、磁場を掃引して電子スピン共鳴に伴う電流変化 ΔI_{CP} をロックイン検出した (図 1a)。測定温度 T は、27K から 300K とした。

同測定の結果 ($T = 27\text{K}$)、電子スピン共鳴に伴う CP 電流の変化 (EDMR 信号) を検出することに成功した (図 1b)。同信号は3つのピークで構成されることが分かり、それぞれのピークの共鳴磁場 (g 値) から、CP 過程に寄与する欠陥の種類は、 P_{b0} センタと E' センタであることを初めて明らかにした (図 1c) [6]。

また、信号強度の温度依存性 ($T = 27\text{K} \sim 300\text{K}$) を取得し解析したところ、スピンの依存した再結合過程は、1つの欠陥サイトに対して2つ目の電子の捕獲とその再結合で説明できることが分かり、このことから、 P_{b0} センタと E' センタを介した CP 過程は2電子モデルに従うことを結論づけた[6]。

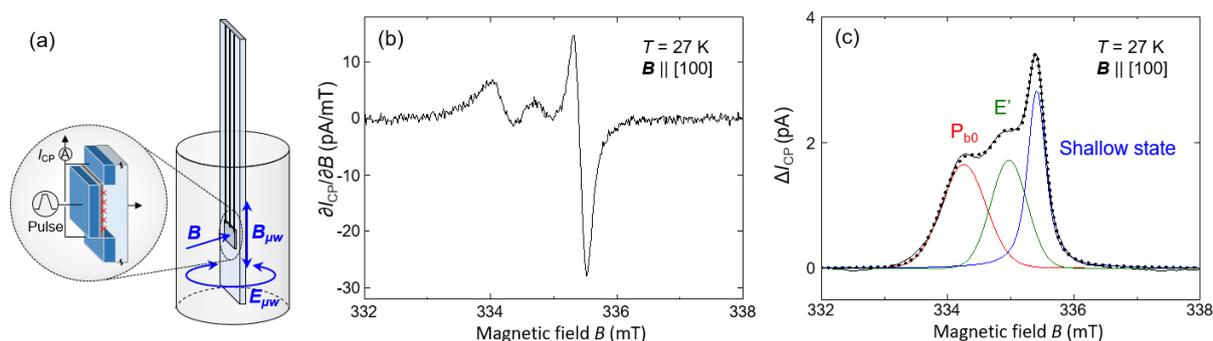


Fig. 1. (a) Setup for CP-EDMR. A MOSFET is mounted on the sample holder and inserted into the cylindrical cavity of the ESR system. Arrow B shows the static magnetic field, while the arrows $B_{\mu w}$ and $E_{\mu w}$ show the microwave magnetic and electric fields, respectively. (b),(c) CP-EDMR characteristics. (b) Output (differential) spectrum measured at 27 K with the magnetic field B parallel to the [100] direction ($B \parallel [100]$). (c) Integrated spectrum. Thin solid curve is the experimental data. This curve is deconvoluted into three components for P_{b0} (red), E' (green) and shallow state(blue), respectively. Their sum is shown by the dotted black curve.

[1] G. Groeseneken et al., *IEEE Trans.* **ED 31**, 42 (1984).

[2] M. Hori et al., *Appl. Phys. Lett.* **105**, 261602 (2014).

[3] M. Hori et al., *Appl. Phys. Lett.* **106**, 041603 (2015).

[4] M. Hori et al., *Appl. Phys. Lett.* **106**, 142105 (2015).

[5] M. Hori et al., *Appl. Phys. Express* **10**, 015701 (2017).

[6] M. Hori and Y. Ono, *Phys. Rev. Appl.* **11**, 064064 (2019).

本研究は、科研費補助金(Nos. 16H02339, 16H06087, 17H06211)、JST CREST(JPMJCR1774)の助成を受けて行われた。