

シリコン MOS 界面におけるチャージポンピング EDMR

Charge pumping electrically-detected magnetic resonance on silicon MOS interfaces

静大電研 [○]堀 匡寛, 土屋 敏章, 小野 行徳Shizuoka Univ., [○]Masahiro Hori, Toshiaki Tsuchiya, Yukinori Ono

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

ゲートへのパルス電圧印加によって誘導される電子正孔再結合は、半導体における基本プロセスであり、MOS トランジスタの界面欠陥を解析するチャージポンピング (CP) 法[1-3]に適用されている。CP 法は欠陥準位を介した再結合 (CP) 電流から欠陥密度やエネルギー分布といった欠陥の電気的性質を解析でき、広く用いられている。しかしながら、欠陥の磁氣的 (スピンの) 性質は解析できず、CP 電流に寄与する欠陥の種類 (化学結合・構造) は同定できていない。また、CP における詳細な再結合過程は明らかでない。このため、我々はこれまでにチャージポンピング法と電子スピン共鳴法とを組み合わせたチャージポンピング EDMR(Electrically detected magnetic resonance)法を立ち上げてきた[4,5]。ここでは、同手法をシリコン MOS トランジスタの SiO_2/Si 界面に適用した。

図 1 にチャージポンピング EDMR の測定系を示す。EDMR は、電子スピン共鳴を (マイクロ波の吸収としてではなく) トランジスタの電流の変化として検出する手法である。ここではチャージポンピングを電子スピン共鳴モードで行うため、ゲートにパルス電圧を印加し、反転状態と蓄積状態との繰り返しで生じる界面欠陥を介した CP 電流 I_{cp} をモニターする。N 型シリコン MOSFET (FN ストレス印加により欠陥密度は $N_{it} \sim 10^{11} \text{ cm}^{-2}$) を配線した状態で電子スピン共鳴装置 (X バンド, 10GHz) のキャビティに挿入し、磁場を掃引して電子スピン共鳴に伴う電流の微小変化 ΔI_{cp} を検出した。

測定結果 (ロックインによる微分波形) を図 2a に示す。また、同波形を磁場で積分した結果を図 2b に示す。電子スピン共鳴に伴うチャージポンピング電流の変化 ΔI_{cp} (チャージポンピング EDMR 信号) が観測された。これをピーク分離したところ、3 つのピークで構成されていることがわかった。それぞれの g 値から信号の起源は、界面 (近傍) の主要な欠陥 (P_{b0} , E')、および伝導帯近傍の浅い準位 (Shallow state, SS) であると考えられる。

次に信号の符号に注目すると、共鳴時では $I_{cp} = 80 \text{ nA}$ (図 2a 挿入図) に重畳してわずかに正に増大 ($2 \sim 3 \text{ pA}$) していることが分かる。これは、トリプレットペア (励起状態) からシングレットペア (基底状態) への遷移[6]によって、再結合レートが増大したものと考えられる。信号強度の温度依存性を含めた、より詳細な解析については当日の発表にて報告するが、チャージポンピングにおけるスピンの依存したプロセスは、電子と電子のスピンペアに起因しており、CP 過程は個々の欠陥サイト (P_{b0} と E') に 2 個の電子が捕獲される 2 電子 CP モデルに従うと考えられる。

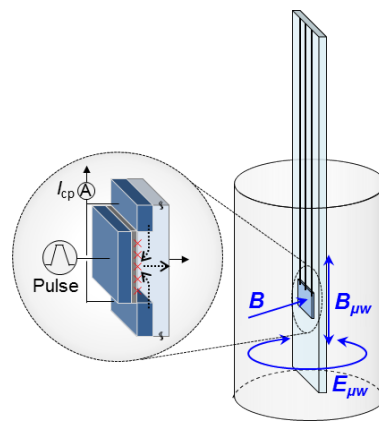


Fig. 1. (Left) Setup for the charge pumping. Dashed arrows show the electron flow (I_{cp}) between the source/drain and the substrate via the interface defects (red cross marks). **(Right)** A MOSFET is mounted on the sample holder and inserted into the cylindrical cavity of the ESR system. The arrow B shows the static magnetic field while the arrows $B_{\mu w}$ and $E_{\mu w}$ show the microwave magnetic and electric fields, respectively.

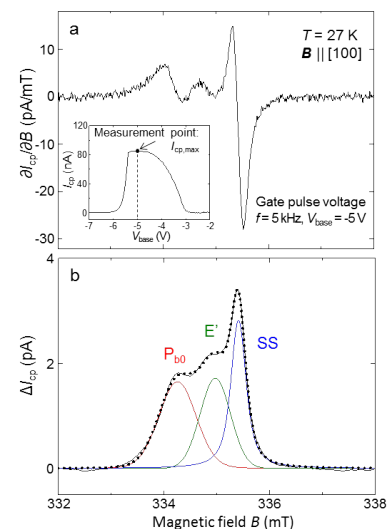


Fig. 2. a Output (differential) spectrum measured at 27 K. **b** Integrated spectrum. Thin solid black curve is the experimental data. This curve is deconvoluted into three Voigt functions for P_{b0} (red line), E' (green), and SS (blue). Sum of them is shown by the dotted black curve.

[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]堀 匡寛他, 第 65 回春季応用物理学会 18a-G203-1 (2018).
[5]M. Hori et al., *Appl. Phys. Express* **10**, 015701 (2017). [6]C. Boehme & K. Lips, *Phys. Rev. B* **68**, 245105 (2003).
本研究は、科研費補助金(Nos. 15K13970, 16H02339, 16H06087)、JST CREST(JPMJCR1774)の助成を受けて行われた。