高感度チャージポンピング EDMR 法の開発

Charge pumping EDMR method towards single interface defect analysis ^o堀 匡寬¹, 成松 諒一², 土屋 敏章³, 小野 行徳¹ (静大電研¹, 富山大², 島根大³) ^oMasahiro Hori¹, Ryoichi Narimatsu², Toshiaki Tsuchiya³, Yukinori Ono¹ (Shizuoka Univ.¹, Univ. of Toyama², Shimane Univ.³)

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

チャージポンピング(CP)法[1-4]は、MOS界面の信頼性評価のために最も広く用いられている手 法である。同手法を用いることで、界面欠陥の個数やエネルギー分布を調べることができるだけ でなく、室温下でたった1個の界面欠陥の検出も可能である[4]。しかしながら、同手法だけでは、 欠陥の種類や化学結合の情報は得られない。我々の最終目標は、電子の「電荷」と「スピン」の 両方の性質を利用することで、1個1個の界面欠陥に対して、電気的性質と磁気的(化学的)性 質を同時に同定する技術を確立することである。そこで、本研究では、「CP 法」に「電子スピン 共鳴法」を組み合わせる。ここでは特に、電子スピン共鳴をデバイス中に流れる電流の微小変化 として検出する Electrically detected magnetic resonance (EDMR)法[5]を用いて、CP-EDMR 法を立ち 上げる。当該手法は、これまでに高い欠陥準位密度を有するワイドギャップ半導体の界面 (SiC/SiO₂)に対して実証されている[6]が、本研究ではこれをシリコン/シリコン酸化膜(Si/SiO₂)の界 面欠陥準位に適用する。そして、その基本動作を確認し、現状の検出感度を見積もる。

図1にCP法の原理図を示す。CP法は、ゲートにパルス電圧を印加することで、反転状態と蓄 積状態を交互に形成し、界面欠陥への電子捕獲と正孔との再結合を繰り返すものである(図1右)。 この一連の素過程により、界面欠陥個数 N_{it}とパルス周波数 f とに比例するチャージポンピング電 流($I_{cp} = N_{it}ef$)が生じる(e は素電荷)。

本測定では、N型シリコン MOSFET をテストデバイスとして使用する。デバイスは、図1のよ うな配線をした状態で汎用 ESR 装置(X バンド) [7]のキャビティー内に挿入される。マイクロ波の パワーを 200mW とし、外部磁場を掃引しつつ、CP 電流 Icp の変化をモニターする。CP のための パルスはf = 1MHz とし、 $I_{cp} = 10$ nA とした。なお、測定はすべて室温で行った。

図2に CP-EDMR の測定結果を示す。電子スピン共鳴時に、 I_{cp} の微小変化 ΔI_{cp} を検出した($\Delta I_{cp}/I_{cp}$ ~10⁵)。g値はg=2.007と見積もられた。このことは、信号の起源が界面近傍のSiダングリング ボンドであることを示唆している。

次に、図 2(a),(b)より信号対雑音比 S/N を調べると、S/N~100fA/1fA = 100 であった。一方、信 号に寄与している欠陥数を、Icpの値から約5×10⁴個と算出した。これより、現状の測定系におけ る欠陥の検出感度を 500 個程度と見積もった。今回、

₁₀₀ (a)

(F)

 ΔV_g =2.24V, Δt =300ns

ĴΔV,

f=1MHz, Icp=10nA

Gate pulse

検出した信号における欠陥数は、以前の報告[6]と比 べても1~2桁小さく、我々の測定系が既に高い検出 感度を有していることが分かった。一方で、単一欠 陥の検出のためには、あと 2~3 桁の雑音の抑制が必 要であることも明らかとなった。



Fig. 1. Setup for the CP measurement (left), and the individual processes (right). The electron-hole recombination at the interface defect states gives rise to the CP current I_{cp} .

Fig. 2. Results of CP-EDMR measurements. (a) Signal, and (b) the noise floor. The gate pulse amplitude $\Delta V_{\rm g}$ and the transient time Δt are also shown in the inset of (a).

Δ/_{cp} ≈ 100fA

3440

3370

[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] T. Tsuchiya and Y. Ono, Jpn. J. Appl. Phys., 54, 04DC01 (2015). [5] M. Hori and Y. Ono, submitted (2016). [6] B.C. Bittel, P. M. Lenahan et al., Appl. Phys. Lett. 99, 083504 (2011). [7] M. Hori et al., Appl. Phys. Lett. 106, 142105 (2015).

本研究の一部は、科学研究費補助金(Nos. 23226009, 25289098, 25706003, 26289105, 15K13970, 16H02339 and 16H06087)の助成を受けて行われた。