

# クライオ CMOS を用いた極低温下における $1/f$ ノイズ発生源の解明

## Understanding the Origin of Cryogenic $1/f$ Noise by Utilizing Cryo-CMOS

産総研 ○岡 博史, 松川 貴, 加藤 公彦, 飯塚 将太, 水林 亘, 遠藤 和彦, 安田 哲二, 森 貴洋

AIST ○H. Oka, T. Matsukawa, K. Kato, S. Iizuka, W. Mizubayashi, K. Endo, T. Yasuda, T. Mori

E-mail: oka.hiroshi@aist.go.jp

**【緒言】** シリコン量子コンピューターの高性能化には、基本素子であるシリコンスピン量子ビットの量子状態の喪失を抑制する必要がある。シリコンスピン量子ビットの量子状態は電気ノイズにより失われることが知られているが[1]、動作環境である極低温下で発生する電気ノイズの起源は解明されていない。本研究では量子ビットの性能を制限するノイズの発生源を特定するため、クライオ CMOS の電流揺らぎから極低温ノイズの解析を試みた。MOS デバイスにおけるノイズとして、移動度揺らぎまたは酸化膜中・界面での電荷の充放電が原因となりうる。本実験では面方位の異なるシリコン基板上に作製したクライオ CMOS の電流揺らぎを系統的に評価することで、極低温下で界面欠陥がノイズに与える影響を明らかにした。

**【実験及び結果】** (100), (120), (111), (110)面のシリコン基板上に、6 nm の熱酸化  $\text{SiO}_2$  をゲート絶縁膜に用いた NMOSFET を作製し[2]、極低温下における低周波ノイズの面方位依存性を評価した。NMOSFET と同一基板上に作製した MOS キャパシタを室温コンダクタンス法により評価したところ、面方位により  $0.4 - 1.9 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1}\text{cm}^{-2}$  の異なる界面準位密度 ( $D_{it}$ ) を有することを確認した (図 1)。図 2 に(100)面上に作製した NMOSFET のドレイン電流揺らぎから求めた低周波ノイズの温度依存性を示す。低周波ノイズはパワースペクトル密度 (PSD) が周波数に反比例する  $1/f$  ノイズであり、50 K 以下で顕著にノイズが増大することがわかった。これは極低温で動作する量子ビットにとって電気ノイズの影響が極めて大きいことを示唆している。極低温下で生じる  $1/f$  ノイズの発生源を特定するため、ノイズの界面準位密度依存性を調べた。図 3 に面方位の異なる NMOSFET の室温および極低温で計測した等価電圧ノイズ ( $\text{S/gm}^2$ ) を示す。300 K ではノイズに面方位依存性がほとんど見られないのに対して、2.5 K では面方位によりノイズに大きな差が見られた。このとき、 $D_{it}$  が最も小さい(100)面でノイズは最小となり、 $D_{it}$  の大きい面方位ほどノイズが増大することがわかった。これは極低温下では、界面欠陥における電荷の充放電がノイズの支配的な要因であることを意味している。以上の結果から、シリコンスピン量子ビットの量子状態は絶縁膜界面の影響を強く受けており、量子状態の維持には界面品質の向上や界面に対するスピンの位置を考慮した素子設計が重要であることが明らかとなった。

**【謝辞】** 本研究は文部科学省 光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP) JPMXS0118069228 の助成を受け行われた。

**【参考文献】** [1] J. Yoneda *et al.*, Nature Nanotechnol. **13**, 102 (2018). [2] H. Oka *et al.*, VLSI Technology TN2.2 (2020).

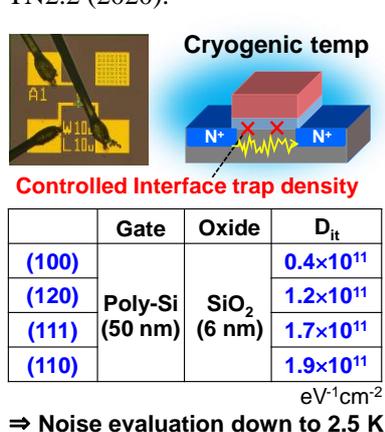


Fig. 1 Device parameters of fabricated Si NMOSFETs with various surface orientations.

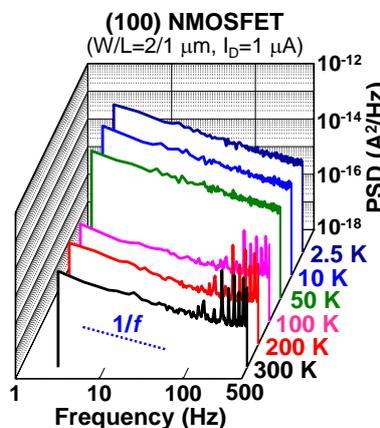


Fig. 2 Temperature dependence of low-frequency noise of Si (100) NMOSFET at  $I_D = 1 \mu\text{A}$ .

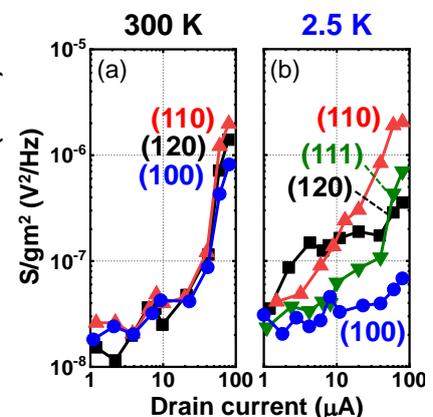


Fig. 3 Voltage noise of NMOSFETs at 40 Hz with various orientations measured at (a) 300 K and (b) 2.5 K.