

100nm-MOSFET に発生する Thermal Noise の Model 化および高周波雑音測定による検証

三浦 道子 (先端研半導体集積科学専攻 教授),
細川 智士 (先端研量子物質科学専攻 M2)

1. 研究目的

近年、素子の MOSFET の微細化に伴い遮断周波数が 100GHz にまで達し、携帯電話や無線 LAN といった RF 回路への応用が進んでいる。しかし、微細化によって MOSFET から発生する Noise は増大の一途を辿っている。回路内に発生する Noise は回路特性において性能の劣化を引き起こすため、高性能な RF 回路の設計を行うためには Noise の影響を考慮に入れる必要がある。Noise の中でも高周波で支配的になる Thermal Noise は、未だ測定技術が確立しておらず、まだ正確な Model 化も行われていない。そこで、本件急では、この Model 化を行い、実測値によって検証を行うことで測定が困難な高周波 Noise の特性を予測出来るようにすることを目的とする。

2. これまでの研究成果概要

一般に、Thermal Noise は周波数依存性がなく、Nyquist の理論より電流雑音スペクトラム密度 S_{id} は以下のように表される。

$$S_{id} = 4kTg_{ds0}\gamma \quad (1)$$

ここで、 g_{ds0} は $V_{ds} = 0$ の時のチャンネルコンダクタンスである[1]。また、係数 γ は長チャンネルにおいて、線形領域では $2/3 < \gamma < 1$ 、飽和領域では $2/3$ へと収束する事が理論から導かれている。一方、短チャンネルでは実測から、収束せず増加する傾向が見られているが、明確な理論はなく実測値も論文によって様々であり統一性がない。そこで、本研究では先ず Thermal Noise の Model 化を Nyquist の理論を短チャンネルに拡張し、長チャンネルでの γ の傾向を見ることで Model の評価を行い、次に実測値と比較をする事で、短チャンネルにおける検証を行う事とする。

Thermal Noise の Model 化

Thermal Noise の Model 化は理論から導出される式(2)を基に行う[2]。

$$S_{id} = \frac{4kT}{L_{eff}^2 I_{ds}} \int_{\phi_{s0}}^{\phi_{sL}} g_{ds}^2(\phi_s) d\phi_s = 4kTg_{ds0}\gamma \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{\int_{\phi_{s0}}^{\phi_{sL}} g_{ds}^2(\phi_s) d\phi_s}{L_{eff}^2 I_{ds} g_{ds0}} \quad (3)$$

式(3)において、Nyquist の仮定に従いチャンネル内の移動度を一定として考えると、 $V_{ds} - \gamma$ 特性は Fig.1 に示すように、チャンネル長を変化させてもどれも $2/3$ に収束していく結果が得られた。

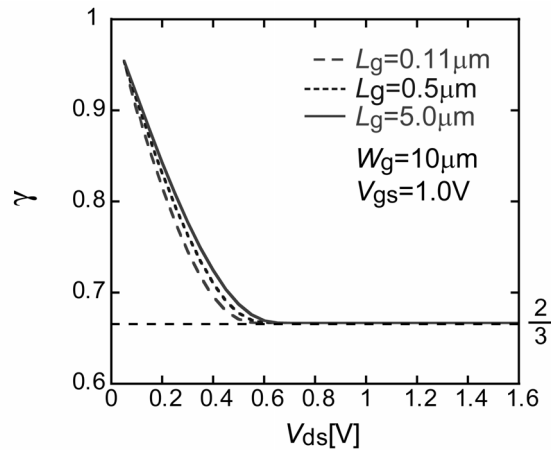


Fig. 1: $V_{ds} - \gamma$ characteristics (constant mobility) .

そこで、式(4)に示すように、移動度をポテンシャルの関数とすることで、チャンネル内の移動度変化を考慮すると、長チャンネルでは γ は $2/3$ に収束していき、チャンネル長が短くなるに従い、飽和領域での γ の傾きが大きくなっていくという傾向が得られた(Fig.2)。

$$g_{ds}(\phi_s) = W_{eff} \frac{d\{\mu(\phi_s)f(\phi_s)\}}{dV_{ds}} \quad (4)$$

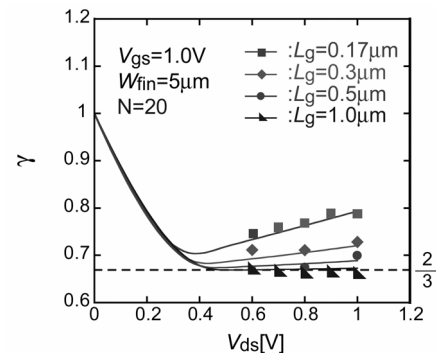


Fig. 2: $V_{ds} - \gamma$ characteristics (considering the mobility reduction along the channel).

そこで、チャンネル内の移動度変化を考慮に入れる式を導入し、式(2)の積分を解析的に解くことで、Thermal Noise の Model 化を行うことが出来た。

高周波雑音測定

今回、高周波での Noise 特性を観測するために、入力端と出力端の信号対雑音比から得られる Noise Figure を用いた式(5)。今回用いた測定システムを Fig.3 に示す。このとき、Noise Figure を電流雑音スペクトラム密度に換算する必要があるため、換算に用いるパラメータの精度良い抽出が必要となる。また、Noise Figure の正確な測定を行うために、キャリブレーションを行い測定誤差の補正をする必要がある。

$$\text{Noise Figure} = \frac{S_{in} / N_{in}}{S_{out} / N_{out}} \quad (5)$$

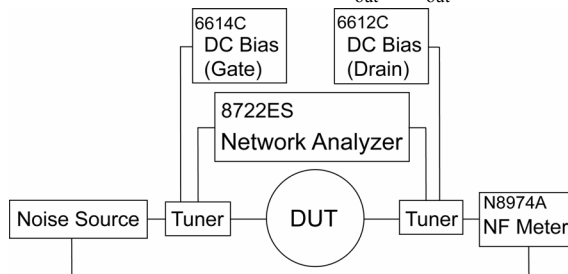


Fig. 3: Noise-figure measurement system.

Model の評価

Thermal Noise は γ で評価することが出来るので、先ず実測値の妥当性を長チャンネルで γ が 2/3 に収束していることで確認した。Fig.4 に、実測値と今回開発した Model を HiSIM に組み込み Simulation で得られた値と比較した結果を示す。図から、今回開発した Model は実測の傾向をよく再現できていることが分かる。このことから短チャンネルでの Thermal Noise 特性をチャンネル内の移動度変化を考慮に入れる必要があることが分かる。また、今回開発した Model は $I-V$ 特性から抽出されるパラメータだけを用いており、他にフィッティングパラメータを必要としない。

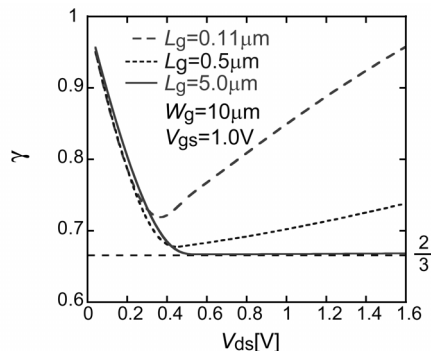


Fig. 4: Theoretical $V_{ds} - \gamma$ characteristics.

次に、電流雑音スペクトラム密度で実測値と Simulation 値を比較した結果を Fig.5 に示す。図から、Simulation 値はバイアス依存性と Noise の大きさがよく再現出来ていることがいえる。

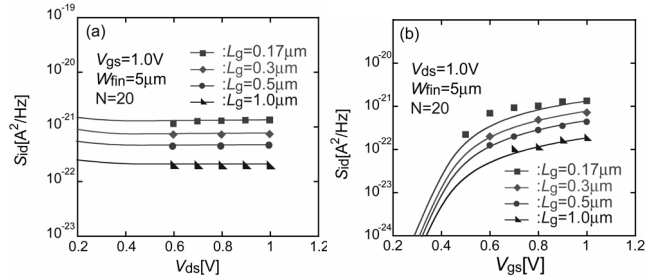


Fig. 5: (a) $V_{ds} - S_{id}$ characteristics (b) $V_{gs} - S_{id}$ characteristics (symbols: measurement, solid lines: simulation).

3. まとめ

チャンネル内の移動度変化を考慮に入れることで短チャンネルにおいても Thermal Noise 特性を予測することができた。

4. 今後の予定

今回はドレイン電流によって誘起される Noise を扱ったが、RF 帯域ではゲートまわりによって誘起される Noise も無視できなくなるので、これらも考慮していきたい。

参考文献

- [1] H. Nyquist, Phys. Rev., **32**, 110 (1928)
- [2] F. M. Klaassen et al., Philips Res. Rpts., **22**, 505 (1967)

5. これまでの研究発表、特許等

国際会議、学会発表

S. Hosokawa, Y. Shiraga, H. Ueno, M. Miura-Mattausch, H. J. Mattausch, T. Ohguro, S. Kumashiro, M. Taguchi, H. Masuda, and S. Miyamoto, *Ext. Abs. Int. Conf. SSDM*, 20 (2003).

特許

2003-420845: Drain-current-thermal-noise analysis and simulation method, 18th December, 2003.