

非均質なリングオシレータを用いた ランダムテレグラフノイズの特性解析

西村 彰平[†] 松本 高士[†] 小林 和淑^{††} 小野寺 秀俊[†]

[†] 京都大学情報学研究科 〒 606-8501 京都市左京区吉田本町
^{††} 京都工芸繊維大学工芸科学研究科 〒 606-8585 京都市左京区松ヶ崎
E-mail: †nishimura@vlsi.kuee.kyoto-u.ac.jp

あらまし 近年のLSIの微細化に伴い、ランダムテレグラフノイズが組み合わせ回路の遅延に与える影響が増大している。非均質なリングオシレータを用いて、ランダムテレグラフノイズが回路に及ぼす影響を正確に見積もる手法を提案する。スイッチング動作におけるPMOSFET、NMOSFETのランダムテレグラフノイズの振幅量およびトラップ数はゲート幅に強く依存することを確認した。ゲート幅の小さいトランジスタを用いる際には、ランダムテレグラフノイズの影響を十分考慮する必要がある。

キーワード CMOS、信頼性、ランダムテレグラフノイズ

Characterization of Random Telegraph Noise using Inhomogeneous Ring Oscillator

Shohei NISHIMURA[†], Takashi MATSUMOTO[†], Kazutoshi KOBAYASHI^{††},
and Hidetoshi ONODERA[†]

[†] Graduate School of Informatics, Kyoto University Yoshida Honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501 Japan
^{††} Graduate School of Science and Technology, Kyoto Institute of Technology Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto,
606-8585 Japan
E-mail: †nishimura@vlsi.kuee.kyoto-u.ac.jp

Abstract RTN has severe impact on combinational logic circuits. Extracting accurate (RTN-induced) variation information is a huge challenge. We estimated RTN amplitude and the number of detectable traps on PMOSFETs and NMOSFETs under operating condition. In both of PMOSFETs and NMOSFETs, RTN amplitude and the number of traps strongly depend on gate area. We should consider Random Telegraph Noise when we design .

Key words CMOS, reliability, Random Telegraph Noise

1. ま え が き

近年のLSIの微細化に伴い、トランジスタの特性ばらつきが回路の信頼性に対して深刻な影響を与えている。回路の信頼性に悪影響を与える主な原因のひとつとしてランダムテレグラフノイズ (RTN : Random Telegraph Noise) があげられる。RTN はしきい値電圧が離散的に時間変動する現象で、PMOSFET、NMOSFET ともに起こるランダムな現象である。RTN はすでに CMOS イメージセンサ [1]、フラッシュメモリ [2]、SRAM [3] といった電子デ

バイスに対して深刻な影響を与えている。また、微細化に伴い RTN は組み合わせ回路の遅延に対しても深刻な影響を与えると予測される [4]。回路の誤動作および歩留まりの低下を防ぐためには、RTN を考慮した回路設計が不可欠である。一般に RTN の特性評価はゲートに直流電圧を印加し、そのときのドレイン電流を測定することによって行われている。この方法は、静的な動作環境での RTN を評価するものであり、実回路におけるスイッチング状態で発生する RTN の評価を行うことは出来ない。

そこで、本研究ではリングオシレータ (RO : Ring Oscil-

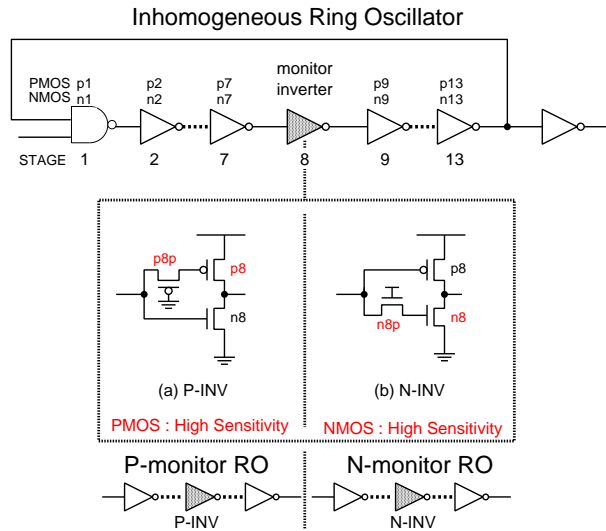


図1 非均質な13段RO。モニタインバータの少数のトランジスタのばらつきの影響が強く現れる。

lator)の発振周波数揺らぎを観測することにより、スイッチング状態で発生するRTNを評価する。多数個のROをチップ上に集積することにより、ランダムな現象であるRTNを高速かつ統計的に解析することが可能である。今回、個々のトランジスタで発生するRTNの観測性を向上させるため、非均質な構造を持つRO [5]を用いた。非均質な構造をもつROでは、少数のトランジスタの特性が発振周波数に強い影響を及ぼす。そのため、敏感なトランジスタで生じたRTNは観測および解析が容易である。本研究の目的は、スイッチング状態にあるトランジスタで発生するRTNが回路に及ぼす影響を正確に見積もることである。回路動作状態におけるRTNの特性解析を非均質なROを用いて行う方法と、解析によって得られたRTNの特性について述べる。

2. 非均質なリングオシレータ

RTNを評価するために用いる非均質なROの回路構造および回路特性について述べる [5]。一般的なROは同一のインバータを環状に接続して構成する。すなわち、均質なROである。各トランジスタのしきい値電圧変動に対する周波数変動量はほぼ等しく、個々のRTNの影響を発振周波数変動として観測することは容易ではない。また、PMOSFETによるRTNとNMOSFETによるRTNを区別することはできない。一方、非均質なROでは、少数のPMOSFETあるいはNMOSFETが、他のトランジスタに比べばらつきに対して敏感である。図1に非均質な13段ROの構造を示す。 i 段目のインバータを構成するPMOSFET、NMOSFETを(p_i , n_i)とする。図1中の(a)(b)は、ROの8段目にそれぞれPMOSFET、NMOSFET

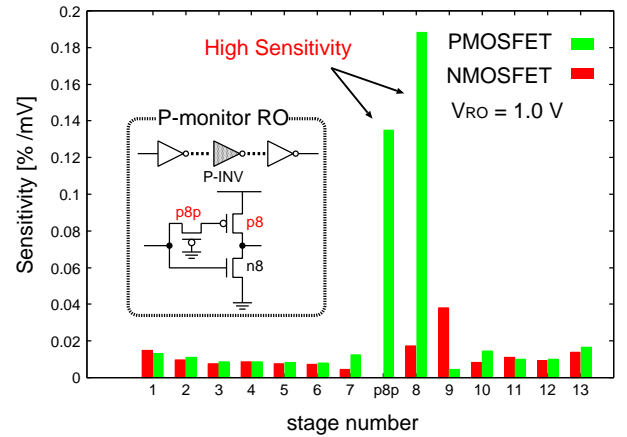


図2 P モニタ RO の各トランジスタの感度。敏感な2つのトランジスタの感度は他のトランジスタの感度の平均に比べ10倍以上である。

のバストランジスタをインバータの入力側に挿入した構造をもつ。このバストランジスタをそれぞれ(p_{8p} , n_{8p})とする。バストランジスタを挿入したインバータをモニタインバータと呼ぶ。図1(a)はPMOSFET、図1(b)はNMOSFETのRTNの影響が周波数揺らぎとしてあらわれる。PMOSFETもしくはNMOSFETを挿入したROをそれぞれ「PモニタRO」、「NモニタRO」と呼ぶ。モニタインバータにおける2つのPMOSFETもしくはNMOSFETのばらつきがROの周波数に大きな影響を与える。

2つのトランジスタが他のトランジスタに比べて敏感であることをシミュレーションで確認する。しきい値電圧変動に対する周波数変動を感度 $\partial F/\partial V_{th}$ と呼ぶ。ROの電源電圧 V_{RO} を1.0Vとしたときの各トランジスタの感度を求めた。図2にPモニタROの各段トランジスタの感度を示す。8段目のバストランジスタの感度は0.31[%/mV]、もう一方のトランジスタは0.22[%/mV]である。他のトランジスタの感度は平均で0.019[%/mV]、最大で0.062[%/mV]であるから、8段目の(p_{8p} , p_{8})のしきい値電圧ばらつきの影響が強く現れる。PモニタROで生じた周波数揺らぎを p_{8p} と p_{8} のいずれかで発生したRTNと仮定することによりスイッチング状態のPMOSFETで発生するRTNの影響を評価できる。RTN程度のしきい値電圧変動に対しては、周波数はほぼ線形に変化する。したがって、感度を求めることが出来れば、周波数変動量よりしきい値電圧変動量を求めることが出来る。なお、2つのトランジスタのうちどちらで生じたかは特定できないため、あるROの周波数揺らぎに対してRTNの振幅量の推定値は2つ得られる。以上の議論はNモニタROでも同様である。

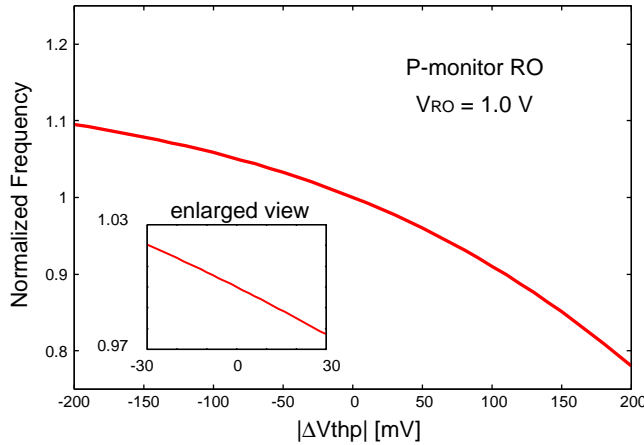


図3 P モニタ RO におけるしきい値電圧の変化に対する周波数変化。RTN に起因するしきい値電圧変動に対してほぼ線形に変化する。

3. 非均質な RO を用いた RTN の特性解析手法

デジタル回路の設計の動作マージンは最悪の場合を想定して設定される。RTN はランダムな現象であり、発生確率を 0 にすることはできない。最悪を想定する場合、重要となるのは最大のしきい値電圧変動量である。RO の発振周波数揺らぎより、しきい値電圧変動量およびトラップ数を見積もる手法について述べる。

3.1 ばらつきを考慮した RTN の振幅量の解析手法

プロセスばらつきに起因したしきい値電圧変動に対して RO の周波数は非線形に変化する。図 3 に P モニタ RO におけるしきい値電圧と周波数の関係を示す。電源電圧は 1.0 V とした。感度の高い 2 つのトランジスタのしきい値電圧 V_{thp8p} と V_{thp8} を ± 200 mV の範囲で同時に変化させた。周波数はしきい値電圧の変動が 0 mV のときの周波数で正規化している。また、 ± 30 mV の範囲の拡大図を示している。このような微小範囲では、ほぼ線形性を示している。一方、プロセスばらつきのような、しきい値電圧の大幅な変動に対しては、発振周波数は非線形に変化する。そのため、個々のトランジスタについて、チップ内ばらつきによるしきい値電圧の変動量を考慮して周波数感度を求めることが重要である。図 4 に標準 P モニタ RO の周波数揺らぎの例を示す。測定した 924 個の RO のうち 3 つの測定結果について示している。測定時間は 1 s である。チップ内ばらつきによってそれぞれの RO の発振周波数はばらついている。各 RO の発振周波数によって感度 $\partial F / \partial V_{th}$ は異なるため、それぞれの RO ごとに感度を抽出する必要がある。

非均質な RO の発振周波数に対して、2 個のトランジスタが高い感度を持つ。従って、この 2 個のトランジスタのプロセスばらつきにより、発振周波数が定まる。感度の

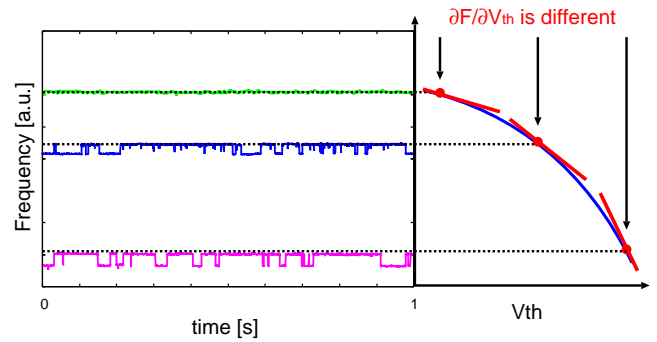


図4 P モニタ RO における周波数の観測結果。周波数によって感度が異なる。

高い 2 つのトランジスタのしきい値電圧 (V_{thp8p} 、 V_{thp8}) を、それぞれ独立に ± 300 mV の範囲で 10 mV ごとに変化させたときの周波数に対する感度 S_{p8p} 、 S_{p8} を図 5 示す。ほぼ同一曲線にのっている。これは (V_{thp8p} 、 V_{thp8}) の組み合わせによらず、発振周波数が決まれば 2 つのトランジスタの感度が一意に決まることを示している。

3.2 トラップ数の推定方法

測定によって得られた周波数変動からトラップの数を推定する方法として EM アルゴリズム [6] および赤池情報量基準 (AIC) [7] を用いた。RO を用いた測定実験において、周波数変動として観測されうるトラップの数はせいぜい 0–3 個程度であった。そのため、 $n = 1, 2, 4, 8$ の場合を想定し、赤池情報量基準が最小となるトラップ数を EM アルゴリズムにより求めた。

4. 回路の動作状態における RTN の特性評価

非均質な RO の発振周波数の実測結果について述べる。RTN に起因する周波数揺らぎとチップ内ばらつきによる周波数ばらつきを比較する。3 節で述べた解析手法から見積もった RTN の振幅量について述べる。また、ゲート

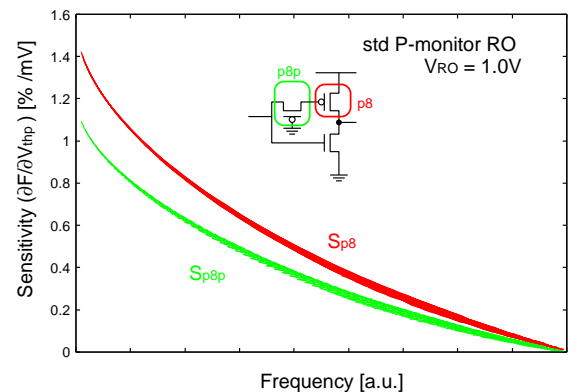


図5 P モニタ RO の周波数と感度の依存性。敏感な 2 つのトランジスタのしきい値電圧の組み合わせによらず周波数によって感度はほぼ一意に決まる。

幅の異なる非均質な RO を用いて RTN の振幅量のゲート幅依存性について述べる。

4.1 非均質な RO における周波数揺らぎ

ゲート幅依存性を評価するために 2 つの敏感なトランジスタ (8p, 8) のゲート幅を変えた RO を用いる。ゲート幅として、スタンダードセル内で用いられているトランジスタと同一なもの (標準) と、製造プロセスで許容される最小のもの (最小) の 2 種類を用意した。(p8p, p8) のサイズが標準もしくは最小の P モニタ RO をそれぞれ「標準 P モニタ RO」、「最小 P モニタ RO」と呼ぶ。N モニタ RO の場合も同様に「標準 N モニタ RO」、「最小 N モニタ RO」と呼ぶ。スイッチング状態のトランジスタで発生する RTN が組み合わせ回路の遅延に及ぼす影響を評価する。電源電圧を 1.0 V として 4 つのモニタ RO 発振周波数を測定した。いずれも測定した RO の数は 924 個である。図 6 に標準および最小 P モニタ RO で観測された最大の周波数揺らぎを示す。また、図 7 に標準および最小 N モニタ RO で観測された最大の周波数揺らぎを示す。周波数は測定時間内の最大周波数 F_{\max} で正規化している。標準 P モニタ RO では 1.1% 揺らいでいるのに対して、最小 P モニタ RO では 16% 揺らいでいる。PMOSFET の場合、最小モニタ RO の周波数揺らぎは標準モニタ RO のそれに比べ 15 倍も大きい。一方、標準 N モニタ RO では 2.3% 揺らいでいるのに対して、最小 N モニタ RO では 4.7% 揺らいでいる。NMOSFET の場合、最小モニタ RO の周波数揺らぎは標準モニタ RO のそれに比べ 2 倍程度大きい。ゲート幅を縮小すると NMOSFET に比べ PMOSFET で発生する RTN の方が回路の遅延に及ぼす影響が大きい。

標準および最小 P モニタ RO の発振周波数は RDF(Random Dopant Fluctuation) [8] によるチップ内ばらつきの影響によりばらつく。図 8 に両者の周波数分布を示す。924 個の RO の平均周波数で正規化している。縦軸は正規分布プロットである。ほぼ直線であることため、RDF による周波数ばらつきは正規分布である。最大周波数ばらつきは標準 P モニタ RO で 13%、最小 P モニタ RO で 81% である。

RDF による周波数ばらつきと RTN による周波数揺らぎを比較する。RDF による周波数ばらつきを $|(f - \mu_f)/\mu_f|$ とする。ただし、 f は各 RO の発振周波数、 μ_f は測定を行った 924 個の RO の平均周波数である。RTN に起因する周波数揺らぎを $\Delta F/F_{\max}$ とする。図 12 に標準および最小 P モニタ RO における $|(f - \mu_f)/\mu_f|$ および $\Delta F/F_{\max}$ の累積度数分布を示す。縦軸は正規分布プロット、横軸

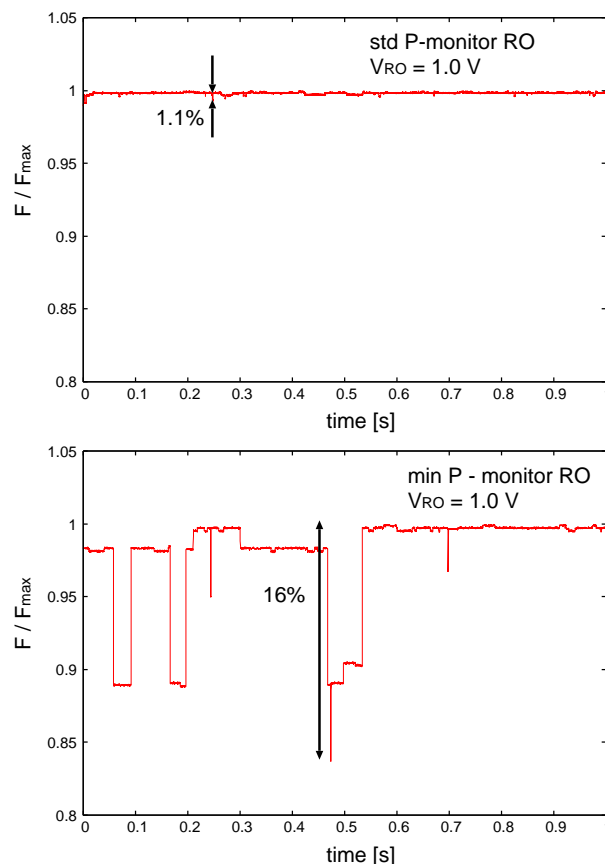


図 6 標準および最小 P モニタ RO の周波数揺らぎの例。

は対数である。電源電圧は 1.0 V である。標準 P モニタ RO では RDF による周波数ばらつきは最大値は 13% であり、RTN による周波数揺らぎは最大で 1.1% である。RDF によるばらつきに対する RTN の揺らぎ量 RTN/RDF は 8% である。一方、最小 P モニタ RO では RDF による周波数ばらつきは最大値は 81% であり、RTN による周波数揺らぎは最大で 16% である。RTN/RDF は 20% である。最小 P モニタ RO の RTN/WID は標準 P モニタ RO のそれに比べ 2.5 倍である。図 12 に標準および最小 N モニタ RO における標準 N モニタ RO では RDF による周波数ばらつきは最大値は 22% であり、RTN による周波数揺らぎは最大で 2.3% である。RTN/RDF は 10% である。一方、最小 P モニタ RO では RDF による周波数ばらつきは最大値は 4.7% であり、RTN による周波数揺らぎは最大で 28% である。RTN/RDF は 16% である。最小 N モニタ RO の RTN/WID は標準 N モニタ RO のそれに比べ 1.6 倍である。PMOSFET、NMOSFET とともにゲート幅を縮小すると RTN/WID は非常に大きくなる。そのため、ゲート幅の小さいトランジスタを用いる際には、RTN の影響を十分考慮する必要がある。

4.2 RTN の振幅量

図 11 に電源電圧 1.0 V のときの PMOSFET、NMOSFET

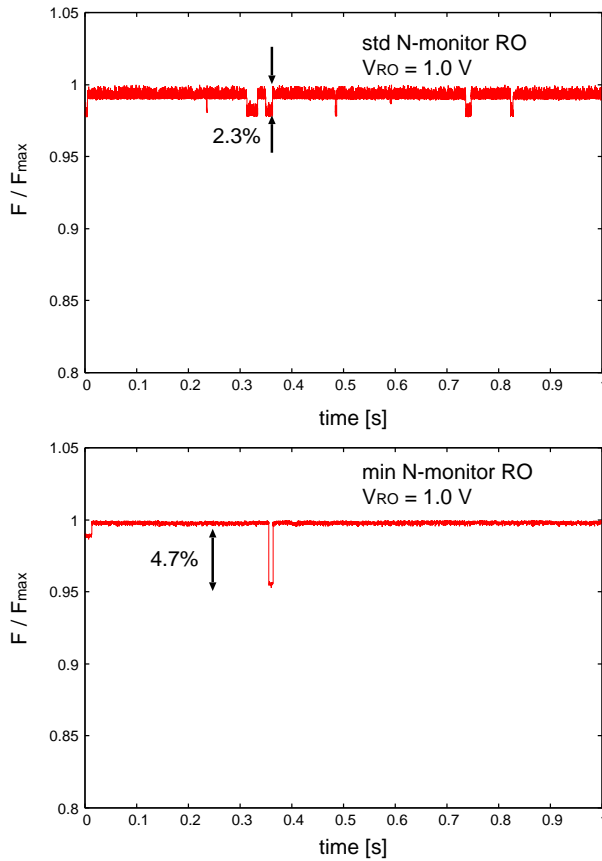


図7 標準および最小 N モニタ RO の周波数揺らぎの例。

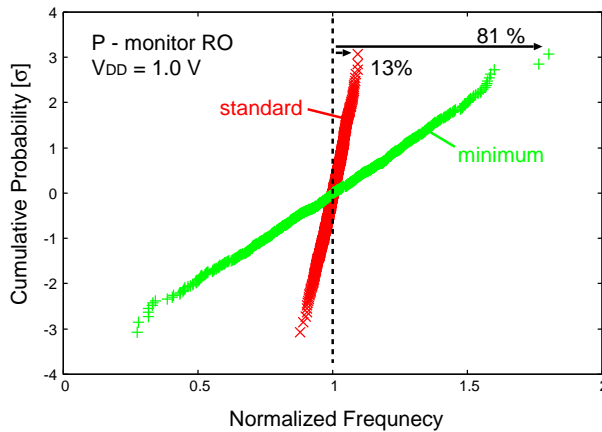


図8 標準および最小 P モニタ RO の周波数の分布。ほぼ直線であるため、RDF による周波数ばらつきは正規分布である。

の $\Delta V_{th(RTN)}$ の累積度数分布を示す。縦軸は正規分布プロットである。分布が直線ではなく尾を引いているため、RTN の振幅量は正規分布に従わない。PMOSFET の RTN の振幅量 $\Delta V_{thp8p(RTN)}$ 、 $\Delta V_{thp8(RTN)}$ の最大値は標準サイズにおいて 9.5 mV、6.9 mV である。最小サイズでは 45 mV、35 mV である。最小サイズにおける PMOSFET の振幅量は標準サイズのそれに比べて 5 倍程度大きい。

NMOSFET の RTN の振幅量 $\Delta V_{thn8p(RTN)}$ 、 $\Delta V_{thn8(RTN)}$ の最大値は標準サイズにおいて 11 mV、8.1 mV である。

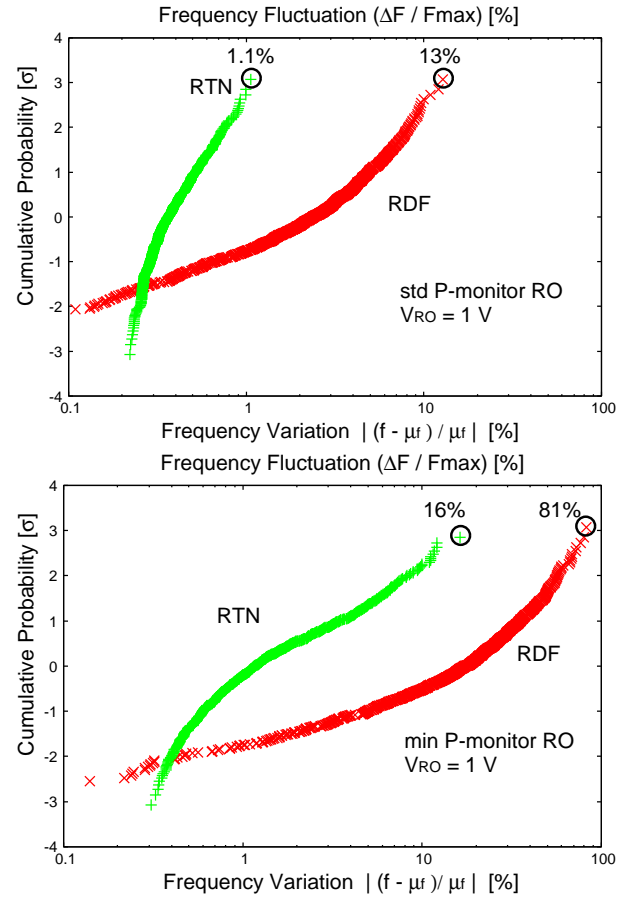


図9 標準および最小 P モニタ RO における RTN による周波数揺らぎと RDF による周波数ばらつきの比較。

最小サイズでは、29 mV、24 mV である。最小サイズにおける NMOSFET の振幅量は標準サイズのそれに比べて 3 倍程度大きい。また、最小サイズのパストラジスタで RTN が生じたと仮定したときの振幅量 ΔV_{th8p} を比較すると PMOSFET が 45 mV であるのに対して NMOSFET では 29 mV である。最小サイズにおいて、PMOSFET、NMOSFET のゲート幅の比は 1 であるが RTN の振幅量は PMOSFET の方が NMOSFET より 1.6 倍程度大きい。そのため、最小サイズの PMOSFET の RTN に起因する遅延揺らぎが非常に大きくなると予測される。

4.3 トラップ数

図 12 に標準および最小モニタ RO の観測可能なトラップ数を示す。電源電圧は 1.0 V である。標準サイズでは PMOSFET と NMOSFET の観測可能なトラップ数は同程度である。一方、最小サイズでは NMOSFET に比べて PMOSFET の方が観測可能なトラップ数が 2 倍以上大きい。

5. 結 論

本研究では、非均質な RO を用いて、スイッチング動作における RTN の振幅量を正確に見積もる手法を提案し

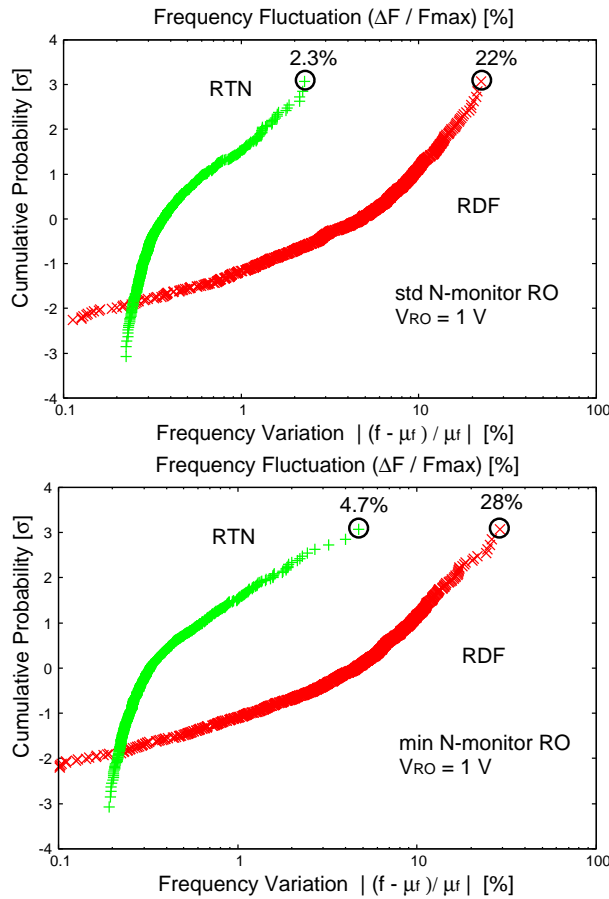


図10 標準および最小 N モニタ RO における RTN による周波数揺らぎと RDF による周波数ばらつきとの比較。

た。スイッチング動作において PMOSFET、NMOSFET の RTN の振幅量およびトラップ数はゲート幅に強く依存することがわかった。標準サイズでは、PMOSFET と NMOSFET の RTN の振幅量およびトラップ数は同程度であった。最小サイズでは、PMOSFET の振幅量と観測可能なトラップ数は NMOSFET に比べてそれぞれ 2 倍、1.5 倍以上大きい。微細化が進むほど PMOSFET が回路に及ぼす影響が深刻化すると予測される。また、RDF による周波数ばらつきに対する RTN に起因する周波数揺らぎは最小サイズにおいて PMOSFET では 20%、NMOSFET で 16%であった。ゲート幅の小さいトランジスタを用いる際には、RTN の影響について十分考慮する必要がある。

文 献

- [1] X. Wang, P. R. Rao, A. Mierop, and A. J. Theuwissen 2006 *International Electron Devices Meeting*, pp. 1–4, 2006.
- [2] A. Ghetti, C. M. Compagnoni, A. S. Spinelli, and A. Visconti *IEEE Transactions on electron devices*, vol. 56, no. 8, pp. 1746–1752, 2009.
- [3] M. Yamaoka, H. Miki, A. Bansal, S. Wu, D. J. Frank, E. Leobandung, and K. Torii 2011 *International Electron Devices Meeting*, pp. 32.2.1–32.2.4, Dec. 2011.
- [4] K. Ito, T. Matsumoto, S. Nishizawa, H. Sunagawa, K. Kobayashi, and H. Onodera 2011 *International Reliability Physics Symposium*, pp. CR.5.1–CR.5.4, Apr. 2011.

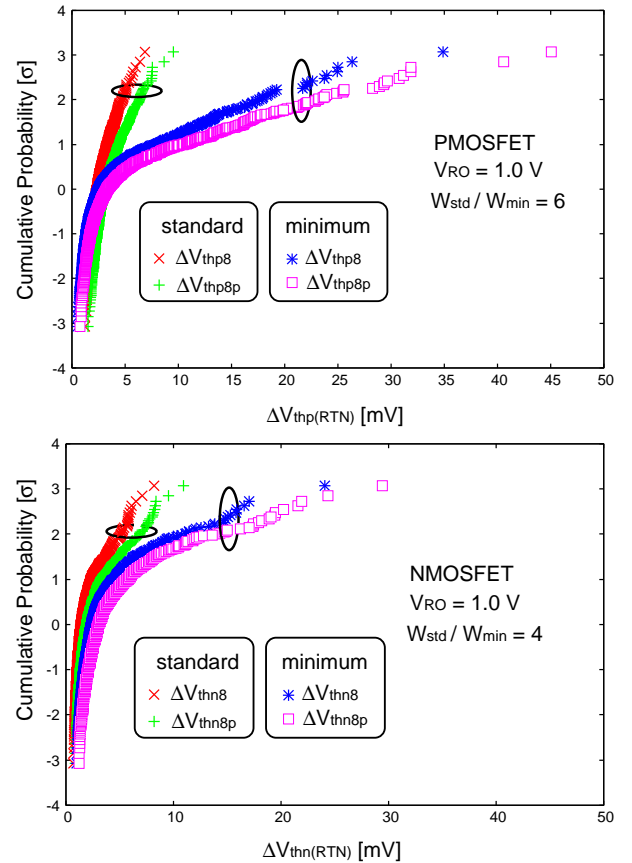


図11 回路の動作状態における PMOSFET、NMOSFET の RTN の振幅量。電源電圧は 1.0 V とした。

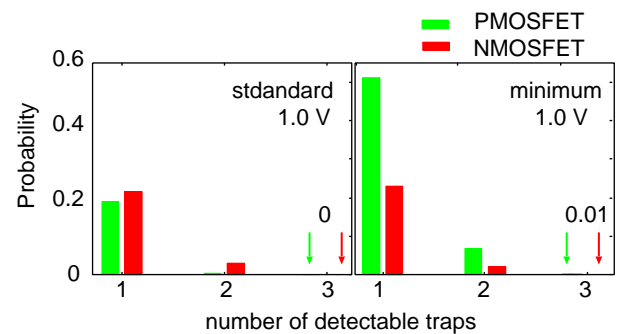


図12 標準および最小 P モニタ RO、N モニタ RO の観測可能なトラップ数。電源電圧は 1.0 V である。

- [5] S. Fujimoto, A. K. M. M. Islam, T. Matsumoto, and H. Onodera *IEEE Transactions on semiconductor manufacturing*, vol. 26, no. 3, pp. 296–305, 2013.
- [6] A. P. Dempster, N. M. Laird, and D. B. Rubin *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, pp. 1–28, 1977.
- [7] H. Akaike *Proceedings of the 2nd International Symposium on Information Theory*, pp. 267–281, 1973.
- [8] A. Asenov, A. R. Brown, J. H. Davies, S. Kaya, and G. Slavcheva *IEEE Transactions on electron devices*, vol. 50, no. 9, pp. 1837–1852, 2003.