

長期間のBTIによる経年劣化におけるリングオシレータの 周波数分散拡大の再現モデル

木下 友晴[†] 岸田 亮^{††} 小林 和淑[†]

[†] 京都工芸繊維大学

^{††} 富山県立大学

あらまし 長期測定システムを用いて、65 nm FDSOI プロセスのリングオシレータ (RO) の Bias Temperature Instability (BTI) 劣化を測定した。測定条件は、温度 125°C、電源電圧は標準動作電圧である 1.2 V、測定期間は 300 日である。長期測定結果として、840 個の RO の平均的な BTI 劣化は、全期間を通して先行研究と同様にべき乗則に従った。840 個の RO の測定結果の分布は、短期間のガウス分布から分散が拡大し、個々の RO の時間変化も増大した。1000 秒時点と 1000 万秒時点の結果を比較すると、840 個の結果の標準偏差が 43% 上昇し、個々の RO の測定ごとの変動は約 3 倍となった。分散の拡大は個々の RO の時間変化の増大によるもので、Random Telegraph Noise (RTN) が原因と考えられる。BTI と RTN によるホールトラッピングモデルによるモンテカルロシミュレーションを行い、偏ったトラップ群、トラップの時定数に比例したしきい値電圧変動量への影響、初期劣化といった仮定を行うことで、実測での分散の拡大の再現が可能となった。

キーワード BTI, RTN, リングオシレータ, 長期測定, モンテカルロシミュレーション, 分布

A Model for Reproducing the Increase in Ring-Oscillator Frequency Dispersion Under Long-term BTI Aging

Tomoharu KISHITA[†], Ryo KISHIDA^{††}, and Kazutoshi KOBAYASHI[†]

[†] Kyoto Institute of Technology

^{††} Toyama Prefectural University

Abstract Bias Temperature Instability (BTI) degradation of ring oscillators (ROs) in a 65 nm FDSOI process was measured using a long-term measurement system. They were measured at a temperature of 125°C and a standard supply voltage of 1.2 V over a period of 300 days. The experimental results showed that the average BTI degradation of the 840 ROs followed a power law throughout the entire duration, consistent with previous studies. However, the distribution of the 840 ROs exhibited an expansion in variance from an initial Gaussian distribution, accompanied by an increase in the time-dependent variation of individual ROs. This expansion in variance is attributed to the increased variation within individual ROs, likely caused by random telegraph noise (RTN). Monte Carlo simulations were performed using a hole-trapping model incorporating both BTI and RTN. By assuming biased trap clusters, MOSFET threshold voltage shift impacts proportional to trap time constants, and initial degradation, the simulation successfully reproduced the experimental measurement results of expansion in variance.

Key words BTI, RTN, Ring Oscillator, long term, simulation, distribution

1. はじめに

半導体の微細化によって、経年劣化現象がますます重要になっている。特に、高い信頼性が求められる車載半導体では顕著で、信頼性の評価は必須のプロセスである。

バイアス温度不安定性 (BTI: Bias Temperature Instability) は、主要な経年劣化現象の 1 つである。BTI は、図 1 に示すようにトランジスタの酸化膜内の欠陥へのキャリアのトラップに起

因し、しきい値電圧 V_{th} の変動を引き起こす [1]。図 2 のように、ストレスをかけることで V_{th} が劣化し、ストレスを取り除くことで劣化の一部が回復する。ランダム・テレグラフ・ノイズ (RTN: Random Telegraph Noise) も BTI に寄与する原因の 1 つである [2]。BTI は、ON 状態の MOSFET に電圧や温度によるストレスがかかることで発生する。信頼性問題は、図 3 に示すパスタブカーブで表現され、BTI は aging、RTN は random に

影響を及ぼす。

経年劣化現象の評価方法として、一般的に加速試験が用いられる。加速試験では、BTIの経年劣化を早めるために、測定対象を高温・高電圧状態にさらす。BTIによる劣化は数多くの先行研究があるが、多くが10万秒未満の短期間の測定に焦点を当てたものである[3]。短期間の加速試験による結果に基づいて経年劣化を正確に予測するためには、長期間の測定(本研究では300日間)と劣化傾向を比較し、同様の傾向が得られるかどうかを検証することが不可欠である。

これを達成するために、Field-Programmable Gate Array (FPGA) とマイコン (MCU) を組み込んだ信頼性評価用の長期測定システムを設計し、リングオシレータ (RO) の経年劣化を評価した。私たちの先行研究[4]では、7 nm FinFET RO の長期測定結果を報告し、発振周波数の低下が見られた。しかし、チップに搭載された RO の数が限られていたため、統計的な知見は得られなかった。

本研究では、65 nm FDSOI (Fully Depleted Silicon On Insulator) プロセスを用いて試作された 840 個の RO の長期測定結果について説明する。この結果は、[5] で報告している。測定結果は、長期間にわたる BTI 劣化の統計的ばらつきに関する包括的な分析を示し、モンテカルロ法を用いたホールトラッピングシミュレーションによって、BTI と RTN によって測定結果を再現するモデルを提案する。

2. 信頼性評価のための長期測定システム

本研究で使用した長期測定システムは、図 4 に示すように、先行研究[4]で報告した設計に基づいている。長期測定システムは、FPGA、MCU、外部電源、および恒温槽で構成される。BTI 劣化の主な要因である電圧と温度を安定供給するためにケルビン接続をした外部電源と恒温槽を採用している。

IBM による先行研究[6]は長期測定の先駆けであり、サーバーを使って 500 日ほどの長期間測定を行っているが、室温環境である。本研究での長期測定システムでは、恒温槽を用いることで安定した高温環境と精密な温度制御が可能であり、長期間にわたって一貫性のある信頼性の高い測定が可能である。

3. 測定するリングオシレータの構造

本研究では、65 nm FDSOI プロセスを用いて試作された RO の劣化を評価した。図 5 に示す FDSOI 構造で、図 6 から 9 の 4 種類をそれぞれ 11 段並べたリングオシレータが測定対象である[7]。4 種類の RO は NBTI (Negative BTI) のみの影響を受ける 2 入力 NOR 型 RO と PBTI (Positive BTI) のみの影響を受ける 2 入力 NAND 型 RO の 2 グループに分類される。NBTI、PBTI のみで劣化する RO には、BTI 発生型 (NBTI-RO、PBTI-RO) と抑制型 (NBTI-R-RO、PBTI-R-RO) の 2 種類ある。抑制型 (Reduction Type) RO の結果は、発生型 RO との差分を分析することで、環境変動の影響を軽減するように設計されている。発振が停止しているとき、NOR 型の PMOS では NBTI、NAND 型の NMOS では PBTI によるストレスがかかり、RO の発振周波数が低下する。分析のため、これら 4 種類の RO を 840 個ずつを集積して単一チップに搭載している。

4. 測定結果

測定条件は次のように設定した。電源電圧 VDD は 1.2 V (65 nm FDSOI プロセスでの標準動作電圧)、環境温度は 125°C (車載半導体の規格である AEC-Q100 のグレード 1 の最高温度[8])、発振時間は 30 μ s、総測定時間は 300 日である。図 10 に示すように、測定間隔は 10 秒、100 秒、1000 秒、10000 秒と徐々に長くなり、最終的に 12 時間に 1 回測定を行う。測定結果として、840 個ある RO の平均を用いる。測定では RO の発振回数を測定し、発振時間 30 μ s で割ることで発振周波数を算出し、初期発振周波数を基準として劣化率を算出する。BTI は V_{th} の劣化であるため、 V_{th} に変換する。hspice を用いたシミュレーションで、BTI で劣化するトランジスタの V_{th} を劣化させたときの発振周波数の変化を求め、1 次近似の変換式を用いる。フィッティングでは、BTI の通説であるべき乗関数 $A \times t^n$ でフィッティングを行う。

図 11 は 4 種類の RO の劣化率を示しており、図 12 は V_{th} の変化量とそのフィッティング結果を示している。NBTI-RO は PBTI-RO よりも 1.2 倍大きい劣化率を示したが、この傾向は短期間の測定における同様の構造に関する先行研究と一致している[3][9]。BTI 抑制型 RO は、300 万秒未満の測定時間では劣化が起これないが、以降では劣化が顕著になる。BTI-RO と BTI-R-RO の劣化の差分 (diff と表記) は、300 万秒以下では環境変動の影響を効果的に軽減した。図 12 に示す NBTI および PBTI による劣化は、測定期間全体に対してべき乗則に従う。差分はこの傾向から外れ、約 100 万秒後に飽和した。これは、300 万秒以降に抑制型 RO が劣化することに起因して、差分によって BTI による劣化が部分的に相殺されることが考えられる。長期的な劣化傾向は短期的な結果と一致しているが、時間指数 n をフィッティングパラメータとした場合は、0.22 から 0.27 と 20% 程度大きくなっている。

本研究における長期測定の時間指数 n は約 1/4 であり、同じ構造を用いた短期測定の結果[3]やべき乗則モデルに関する複数のモデルでの先行研究[9]での値 1/6 と比較して 50% ほど大きい結果となっている。BTI のべき乗モデルに関する複数のモデルでの先行研究と異なる原因は、先行研究は RO ではなくトランジスタ単体での超高速測定を行い、ストレス状態から測定までの遅延を最小限にとどめている。この遅延が大きいほど時間指数 n も大きくなると先行研究で述べており、本研究の目的は長期測定であり、ストレス状態から測定開始までの遅延は減らすことができない。本研究では、ストレス状態から測定までの遅延は超高速測定などと比較して長く、時間指数 n が大きい原因と考えられる。

5. 長期測定で見られる発振周波数分散の拡大

840 個の RO の結果について、初期発振周波数から 840 個の分布から 5% から 95% まで 5% 間隔で示し、平均値と比較する。

発振周波数の分布を片対数グラフとリニアの 2 種ずつ、図 13、14 に示す。折れ線はそれぞれ 1 つの RO の結果を示す。100 万秒以降、個々の RO の変動がおおきくなるとともに、分布が拡大

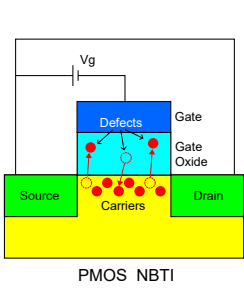


図1 NBTIの発生原理

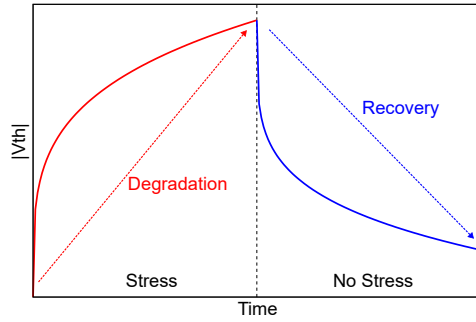


図2 BTIの劣化・回復現象

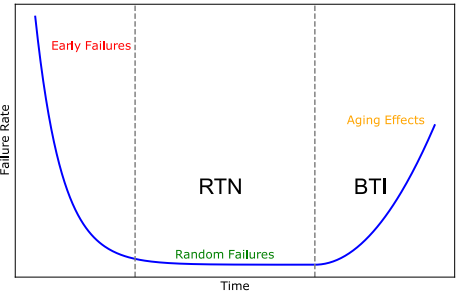


図3 パスタブカーブで示される信頼性問題

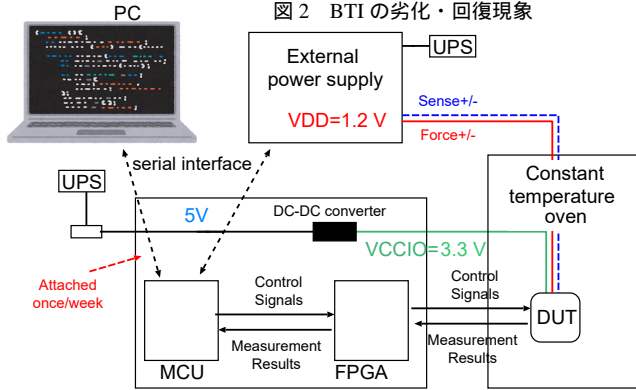


図4 測定系の概略図

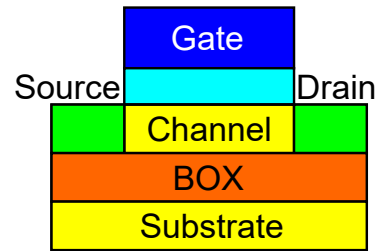


図5 FDSOI構造

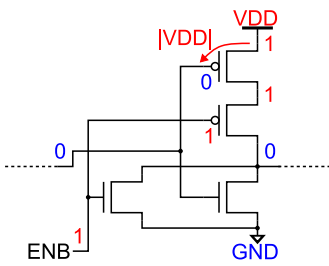


図6 NBTI-ROの構造

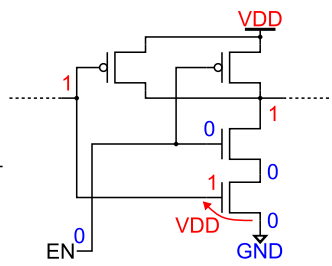


図7 PBTI-ROの構造

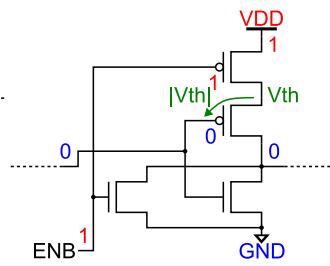


図8 NBTI-R-ROの構造

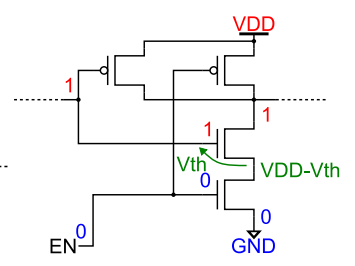


図9 PBTI-R-ROの構造

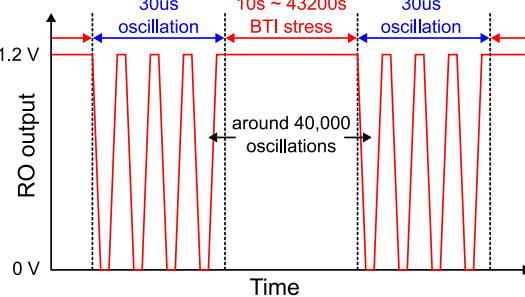


図10 測定方法

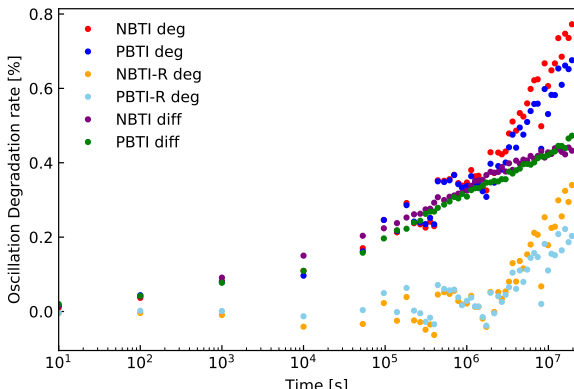


図11 4種類の発振周波数の劣化率

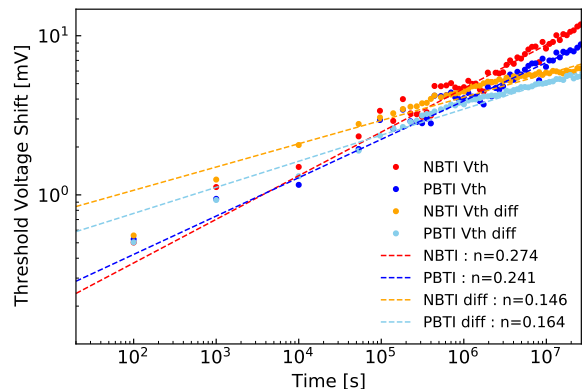


図12 BTI発生型と差分結果の ΔV_{th} とフィッティング結果

するように変化した．1000 秒時点から 1000 万秒時点での 840 個の RO の発振周波数を比較すると，平均値は 1.25 GHz から 1.24 GHz へ 0.55% 程度低下した一方，標準偏差は 1.68% から 2.41% へ 43% 増加する．電圧や温度の変化といった環境変動では，上下にシフトし分布の形状を変化しないため，実測で観測された分布の拡大は環境変動が原因とは考えられない．

図 17 に示すように正規分布の指標である歪度 (skewness) と尖度 (kurtosis) を用いて分布を評価する．歪度は時間経過とともにわずかな変化しか起こらないが，尖度は -0.4 から -1.2 へ著しく変化した．ガウス分布は尖度が 0 で，一様分布では -1.2 であるため，この結果は，長期ストレスによって，複数のガウス分布重ね合わせ (ガウス混合分布) の結果として，一様分布に近づく傾向が見られることを示す．図 17 中の破線での 840 個の RO の結果の分布をヒストグラムで図 19, 20 に示す．

図 18 に示すように，RO 個々の発振周波数の変動もストレス時間の経過とともに大きくなる．変動は 100 万秒以降大きくなり，この傾向が他の RO でも同様にみられる．1000 秒と 1000 万秒で比較を行う．それぞれの周囲 5 点での発振周波数の変動の標準偏差を求めた．結果として，変動の 840 個の平均として，1000 秒付近では 0.587% が，1.67% と約 2.84 倍と変動が非常に大きくなっている．個々の RO の変動が，全体の分布の広がり主な原因と考えられる．また，個々の RO が大きな変動を示すことから，ランダム・テレグラフ・ノイズ (RTN) が原因の 1 つである可能性が高い [10]．個々の RO の大きな変動は，4 種類の RO 全てで観測されるため，BTI のみに起因するものではない．長期ストレスにより，大きな V_{th} 変動を引き起こすトラップが活性化することを考慮する必要がある．

6. 発振周波数分散を再現するモンテカルロシミュレーション

実測で見られた BTI, RTN 起因の V_{th} の平均劣化および分散の拡大を，ホールトラッピングモデルによるモンテカルロシミュレーションによって再現する [11]．

6.1 ホールトラッピングモデル

6.1.1 トラップモデル

酸化膜内のトラップによりホールトラッピングは起こり，トラップは個々に捕獲・放出時定数を持つ．時定数は対数一様分布 (10^0 s から 10^9 s の範囲内) で持ち，実測で見られた分散の拡大の原因として，一部のトラップは偏って存在することを仮定する．実測では，100 万秒以降から RO 個々の発振周波数の増減が激しくなり，分散の拡大が見られ始めた．偏ったトラップ群は 100 万秒程度の時定数を持つことを仮定する．今回のシミュレーションでは，一様に分布するトラップ群が 100 個，偏ったトラップ群は 50 個を基準として試行ごとにランダムとしている．また，トラップ毎の ΔV_{th} への寄与を，式 (1) のように捕獲・放出時定数に比例すると仮定する．式 (1) では， k 番目のトラップの ΔV_{th} へ寄与する振幅 a_k を，基準値 ΔV_0 と放出時定数 T_e と捕獲時定数 T_c を用いて示している．基準値 ΔV_0 は，65 nm FDSOI プロセスであるため， 1×10^{-4} V とした．時定数の大きさは，チャンネル距離のみではなく，トラップ自体のエネ

ルギーの大きさでも変化する．

$$a_k = \Delta V_0 (T_e)^{0.2} (T_c)^{0.2} \quad (1)$$

実測では，分散の拡大によって，劣化率がマイナスになることも増加する．これを再現するためには，初期状態で既に捕獲状態のトラップが存在すると仮定した．使用している測定チップでは，長期間の測定以前にも短期間の測定に用いたことがあるため，一様に分布するトラップ群の 40% が初期状態で捕獲状態にあるとした．

6.1.2 捕獲・放出の確率過程

シミュレーションでは，実測と同様にストレス期間と測定期間に分けており，最大 12 時間おきに測定を行う実測と同様に，12 時間ごとに捕獲放出判定を行っている．測定ごとに，式 (2) の判定を行う．状態更新は，既に捕獲状態なら放出確率 p_{emi} ，捕獲状態でなければ捕獲確率 p_{cap} を用いて行う． Δt は判定までのストレス時間であり，以前に判定に使用したストレス時間は加えない．

$$p_{cap} = 1 - e^{-\Delta t/T_c}, \quad p_{emi} = 1 - e^{-\Delta t/T_e} \quad (2)$$

6.2 シミュレーション結果

シミュレーション結果として，仮定したトラップの時定数分布 (840 回の試行の 1 つ) を図 21, ΔV_{th} の時間変化と分布をそれぞれに図 22, 23 に示す．実測での発振周波数に換算し，初期状態の分布を付与した分布について，片対数グラフを図 24, リニアグラフを図 25 に示す．

1000 秒と 2000 万秒を比較すると，平均の発振周波数は，1.25 GHz から 1.24 GHz となり，約 0.823% 低下する．標準偏差は，1.24% から 1.47% へ 19% 上昇する．実測結果と比較すると，840 個の平均は単調劣化を示すが，長期間のストレスによって分散が拡大する傾向を再現することができている．一方で，実測では，1000 秒から 1000 万秒で，標準偏差が 43% 増加したのに対して，シミュレーションでは 19% と，実測を再現しきることはできていない．RO 個々の結果のシミュレーションでは，シミュレーションでは，試行ごとの変動をみると，変動の大きさを標準偏差で見ると約半分となる．実測で見られた RO 個々の変動の拡大は，シミュレーションでは再現することができなかった．

7. 結 論

長期測定システムを用いて，65 nm FDSOI プロセスのリングオシレータ (RO) の Bias Temperature Instability (BTI) 劣化を測定した．測定条件は，温度 125°C，電源電圧は標準動作電圧である 1.2 V，測定期間は 300 日である．長期測定結果として，840 個の RO の平均的な BTI 劣化は，全期間を通して先行研究と同様にべき乗則に従った．840 個の RO の測定結果の分布は，短期間のガウス分布から分散が拡大し，個々の RO の時間変化も増大した．1000 秒時点と 1000 万秒時点の結果を比較すると，840 個の結果の標準偏差が 43% 上昇し，個々の RO の測定ごとの変動は約 3 倍となった．分散の拡大は個々の RO の時間変化の増大によるもので，Random Telegraph Noise (RTN) が原因と考えられる．BTI と RTN によるホールトラッピングモデルによるモンテカルロシミュレーションを行い，偏ったトラップ群，

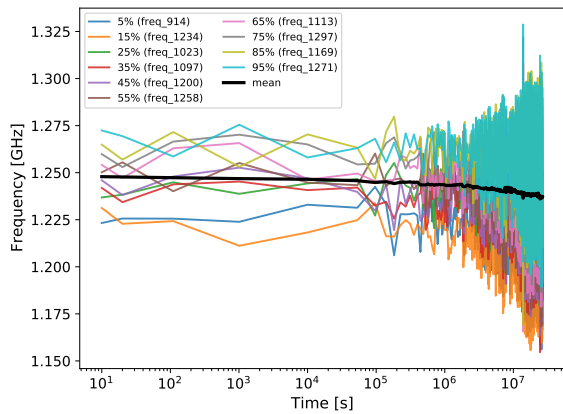


図 13 片対数グラフでの長期測定の分布

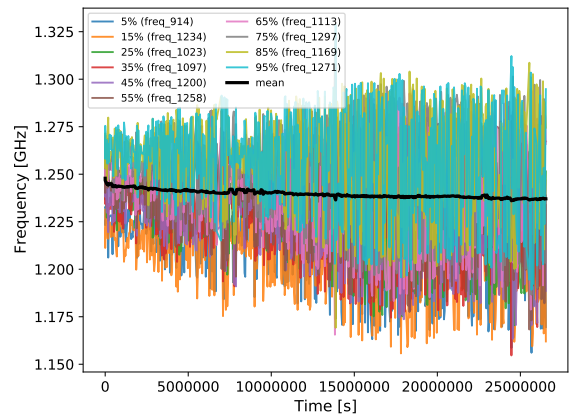


図 14 リニアグラフでの長期測定の分布

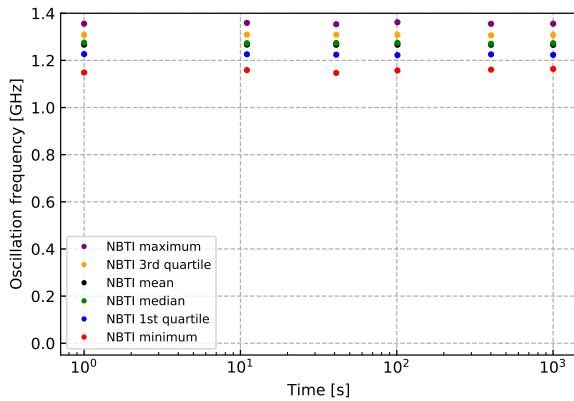


図 15 1 か月間の室温でのストレス除去の後の 100°C での NBTI-RO の測定結果

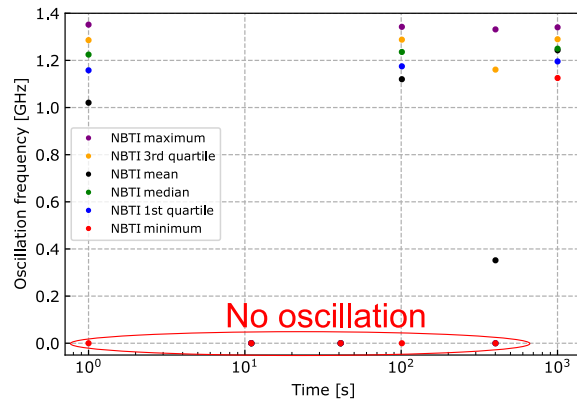


図 16 1 か月間の室温でのストレス除去の後の 120°C での NBTI-RO の測定結果

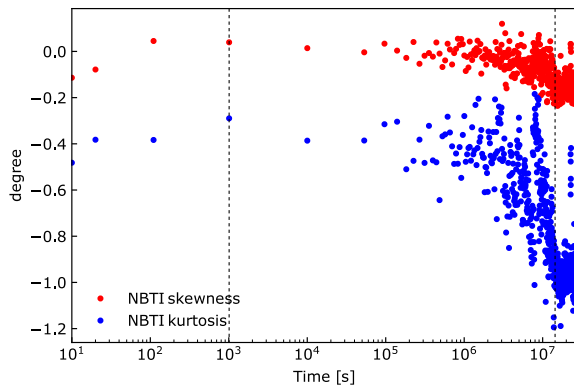


図 17 長期測定での NBTI-RO の分布の歪度と尖度

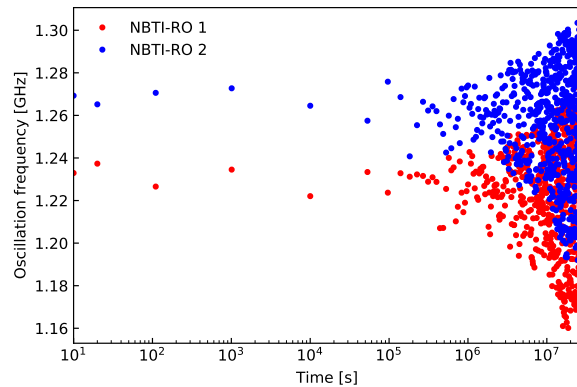


図 18 NBTI-RO の 2 つの RO の発振周波数の時間変化

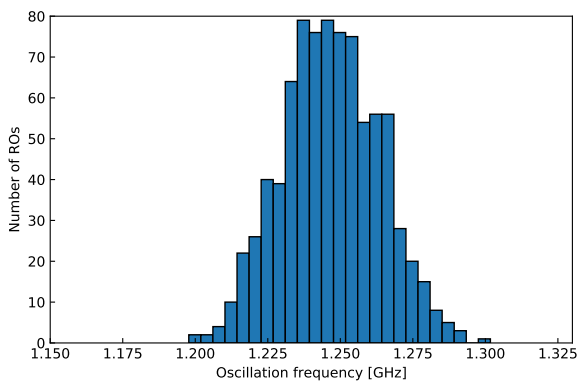


図 19 1010 秒での NBTI-RO の発振周波数分布

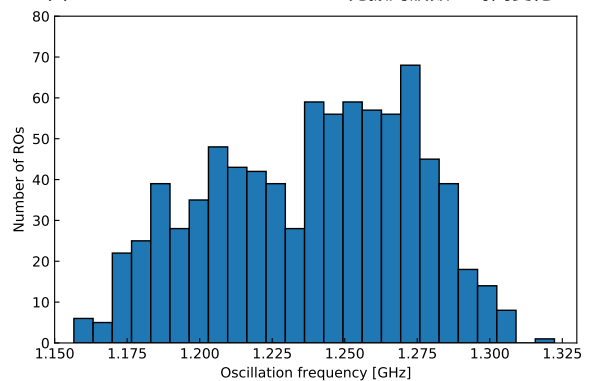


図 20 1670 万秒での NBTI-RO の発振周波数分布

トラップの特定数に比例したしきい値電圧変動量への影響，初期劣化といった仮定を行うことで，実測の再現が可能となった．一方で，RO 個々の変動の拡大は，シミュレーションでは再現することができていないため，シミュレーションを再考する必

要がある．

謝辞 本研究に用いたチップはルネサスエレクトロニクス株式会社により試作されたものであり，東京大学 d.lab における VDEC 活動を通して，日本シノプシス合同会社，日本ケイデン

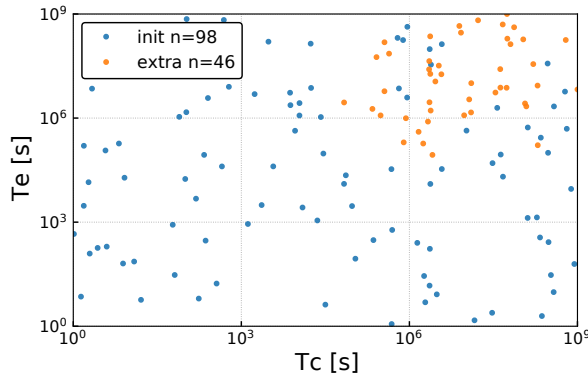


図 21 シミュレーションで仮定したトラップの時定数分布

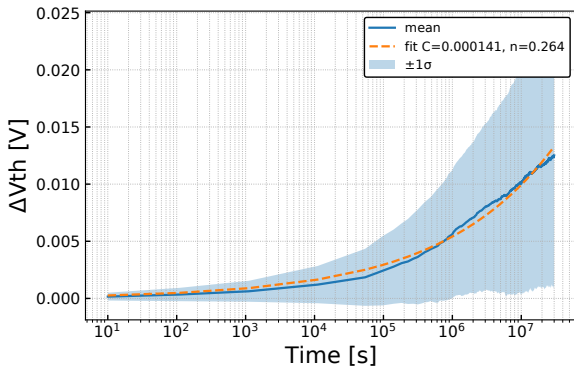


図 22 シミュレーションでの ΔV_{th} の平均劣化と標準偏差

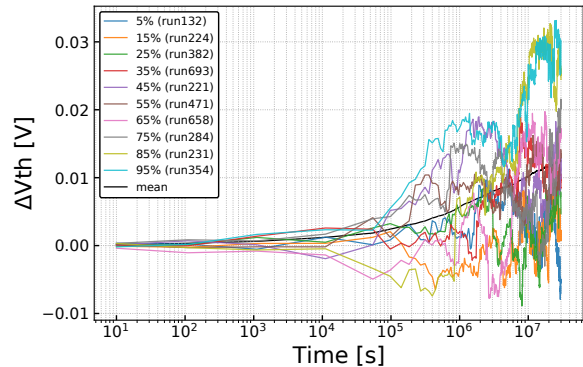


図 23 シミュレーションでの ΔV_{th} の 840 回の試行の分布

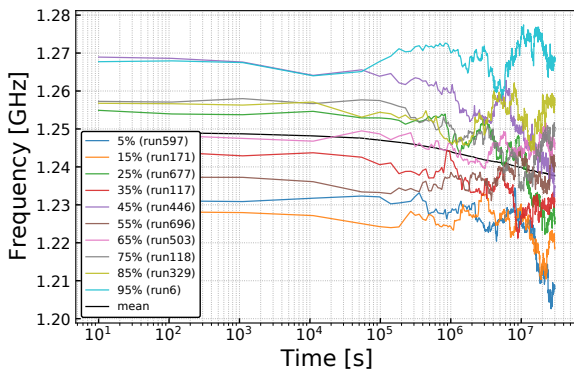


図 24 シミュレーションでの発振周波数分布 (片対数)

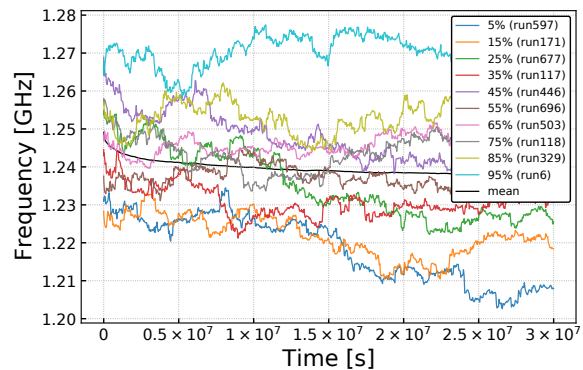


図 25 シミュレーションでの発振周波数分布 (リニア)

ス・デザイン・システムズ社，シーメンス EDA ジャパン株式会社の協力で行われたものである。

文 献

- [1] V. Huard, C. Parthasarathy, C. Guerin, T. Valentin, E. Pion, M. Mammasse, N. Planes, and L. Camus, "NBTI degradation: From transistor to SRAM arrays," 2008 IEEE International Reliability Physics Symposium, pp.289–300, April 2008.
- [2] T. Matsumoto, K. Kobayashi, and H. Onodera, "Impact of random telegraph noise on CMOS logic circuit reliability," Proceedings of the IEEE 2014 Custom Integrated Circuits Conference, pp.1–8, 2014.
- [3] R. Kishida, T. Asume, J. Furuta, and K. Kobayashi, "Extracting Voltage Dependence of BTI-induced Degradation Without Temporal Factors by Using BTI-Sensitive and BTI-Insensitive Ring Oscillators," IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, vol.33, no.2, pp.174–179, 2020.
- [4] K. Kobayashi, T. Kishita, H. Nakano, J. Furuta, M. Igarashi, S. Kumashiro, M. Yabuuchi, and H. Sakamoto, "Ultra Long-term Measurement Results of BTI-induced Aging Degradation on 7-nm Ring Oscillators," 2023 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS), pp.1–7, 2023.
- [5] T. Kishita, R. Kishida, and K. Kobayashi, "Investigation of the time-dependent bti-induced degradation distribution for ring oscillators in

ultra-long-term stress conditions," 2025 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS), pp.1–4, 2025.

- [6] P.-F. Lu and K.A. Jenkins, "A built-in BTI monitor for long-term data collection in IBM microprocessors," 2013 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS), pp.4A.1.1–4A.1.6, 2013. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6532003>
- [7] M. Bhushan and M.B. Ketchen, "Generation, elimination and utilization of harmonics in ring oscillators," 2010 International Conference on Microelectronic Test Structures (ICMTS), pp.108–113, 2010.
- [8] A. Council, "FAILURE MECHANISM BASED STRESS TEST QUALIFICATION FOR INTEGRATED CIRCUITS," AEC-Q100-Rev-H, Automotive Electronics Council, p.3, Sept. 11, 2014.
- [9] S. Mahapatra, V. Huard, A. Kerber, V. Reddy, S. Kalpat, and A. Haggag, "Universality of NBTI - From devices to circuits and products," 2014 IEEE International Reliability Physics Symposium, pp.3B.1.1–3B.1.8, June 2014.
- [10] T. Grasser, K. Rott, H. Reisinger, M. Waltl, J. Franco, and B. Kaczer, "A unified perspective of RTN and BTI," 2014 IEEE International Reliability Physics Symposium, pp.4A.5.1–4A.5.7, 2014.
- [11] T. Grasser, H. Reisinger, P.-J. Wagner, F. Schanovsky, W. Goes, and B. Kaczer, "The time dependent defect spectroscopy (tdds) for the characterization of the bias temperature instability," 2010 IEEE International Reliability Physics Symposium, pp.16–25, 2010.