

学位被授与者氏名	ソムハ ウォラウィット (Somha Worawit)
学位の名称	博士 (工学)
学位番号	博 (一) 第 4 0 号
学位授与年月日	平成 2 7 年 3 月 2 0 日
論文題目	A Study on Time Dependent Variations Caused Rare-Event Fail Bit Count Prediction Analysis Methods for Nano-Meter Scaled SRAM Reliability Designs
論文題目 (英訳または和訳)	ナノメータ時代の信頼性設計のための時間依存性ばらつきに起因する稀な SRAM 不良事象を予測する解析手法の研究
論文審査委員	論文審査委員会 委員主査 : 福岡工業大学大学院知能情報システム工学専攻教授 山内 寛行 同審査委員: 福岡工業大学大学院知能情報システム工学専攻教授 種田 和正 同審査委員: 福岡工業大学大学院知能情報システム工学専攻教授 バロレ村松 同審査委員: 福岡工業大学大学院物質生産システム工学専攻教授 江口 啓
論文審査機関	福岡工業大学大学院工学研究科
論文内容の要旨 (和文)	<p>過去数 10 年にわたる VLSI のスケールリングが劇的に情報機器のコストパフォーマンスを向上させ民生レベルの高性能なスマートフォンの出現を可能にした。今後も継続的に VLSI のスケールリングが求められているが、すでにその基本素子のサイズは原子サイズに接近し、時間依存性を持つ原子的レベルのバラツキ挙動が不良を誘引する確率がもはや無視できなくなっている。そのため、製品出荷後に変動する不良確率を高精度で予測しないと市場での信頼性不良が多発する問題が懸念されている。そこで本研究では、従来の不良確率予測手法の限界とその影響を定量化し、新手法の重要性を明確にした後、予測精度を向上させるための解析手法の提案を行い効果を確認した。本研究は、不良確率の予測手法として、製造後に既知となるバラツキ(RDF)分布と出荷後でも変動する(RTN)バラツキ分布の畳み込み計算で全体のバラツキ分布を予測する順方向問題と、全体の目標とするバラツキ分布から未知のバラツキ分布(RDF, RTN)を逆に予測する逆畳み込み計算 (逆問題) の解析手法の両方を研究対象とした。さらに、RTN 分布を従来のガウス分布より長い裾を引くガンマ分布やその混合分布を対象にした。IEEE 関連の学会で最優秀論文を獲得したこの種の研究は未だ誰からもほとんど報告されておらず、他分野で提案されている解析手法との比較しか可能でないが、優位性は明確でその成果は高く評価されている。本論文はその新規性の部分を中心に以下の様に 9 章から構成されている。</p> <p>第 1 章では、序論として、VLSI のスケールリングに伴い直面する課題を含めた研究背景と従来手法の問題点を述べ、研究目的と目標を述べる。第 2 章ではガウス分布より長い裾を引くガンマ分布を対象に、稀な事象を精度良く予測するために裾部分の精度を劣化させない混合ガウスで近似する新規の EM アルゴリズムを提案し効果を検証する。第 3 章では広範囲で異なる裾の傾き、長さを持つ各種ガンマ分布に対する適用性を向上させるテーブルルックアップを含む近似手法を提案し効果を検証する。第 4 章では、新規な取り組みである VLSI 信頼性設計フローにおける畳み込み解析と逆畳み込み解析についての応用例を議論し、逆畳み込み解析については未知の分布数によって異なるブラインドとノンブラインドの違いについても議論する。第 5 章では、世の中で多く使用されている逆畳み込み解析の計算アルゴリズムの分類と精度、収束性、安定性と、本研究の目的に適用した場合の誤差量や課題の比較結果を示す。第 6 章では、従来の問題を解決するノンブラインドの逆畳み込み解析の計算アルゴリズムを提案し検証する。第 7 章では、第 6 章で提案する手法の残された課題する可能性のある計算アルゴリズムを複数提案し検証する。第 8 章では、ブラインドの逆畳み込み解析の計算アルゴリズムを複数提案し検証する。第 9 章では本論文の主要な結果を要約し、将来の信頼性設計に適用可能性と課題について述べる。</p>
論文内容の要旨 (英文)	Thanks to the sustained CMOS scaling in four decades, the element device has been made smaller by orders of magnitude and enabled to pack over 10 billions of them on the one chip. This allows to design and ship a high-performance commodity smartphone to our society. The scaling treadmill will have to sustain to fulfill the demand of the performance per cost for ever. However the size of element device has approached to an atomic size and conventionally ignored time-dependent (TD) atomic

behavior caused variations will pose as a major challenge and barrier to a secure device screening design for avoiding any reliability troubles in the market. TD-margin variations (MV)-caused failures will become no longer ignored and cannot be precisely predicted using the ordinary Gaussian-based convolution analyses because (1) TD-MV will become much larger than the non-TD-MV, resulting in the TD-MV dominating over the overall MV. This leads to a rapid increase in pressure to determine the unknown factors by solving the inverse problem, even though SRAM designers are unfamiliar with such a methodology, and (2) the tail distribution of the convolution results of the TD-MV and non-TD-MV no longer shows Gaussian behavior but more complex mixtures of Gamma distributions. Thus, in this study, the non-Gaussian inverse problem to be solved based on the pre-defined hypothesis of the unknown factors or final target specifications will be more intensively discussed. The algorithms for solving those problems are proposed and demonstrated compared with the conventional ones, while devoting more pages to highlight its originalities that are appreciated as the best paper award by IEEE conference.

This thesis is organized into the following nine chapters. Critical issues posed by further sustained scaling are introduced first followed by discussing the background and objectives behind this study in Chapter-1. Segmented EM algorithm is proposed to increase the accuracy of fitting a non-Gaussian long tail distribution with the Gaussian mixtures in Chapter-2. Table-lookup based algorithms are proposed to expand the versatility of type of distributions in Chapter-3. Potential applications of solving the forward problems/inverse problems, i.e., convolutions/non-blind and blind deconvolutions in VLSI design flows are introduced and discussed in Chapter-4. The proposed algorithms and its verification results are discussed and demonstrated in Chapter-5 following the verifications of the issues facing the conventional algorithms in Chapter-6. In Chapter-7, the proposed algorithms are further evolved to overcome some obstacles still facing the proposed ones when adopting the some unique distributions. Blind deconvolution algorithms and its verification results are proposed and demonstrated while comparing with the results for the non-blind cases in Chapter-8. To summarize this thesis, a brief summary for main achievements is given followed by describing the prospective challenges and future work in Chapter-9.

論文審査結果

博士後期課程知能情報システム工学専攻3年の Worawit Somha 氏が提出した博士学位論文を審査し、また、最終試験を実施したのでその結果について報告する。

<学位論文審査報告書>

過去40年以上の継続的なVLSIのスケールングにより、その基本素子のサイズは原子サイズに接近し、時間依存性を持つ原子的レベルのバラツキ挙動に起因した不良確率もはや無視できなくなり、製品出荷後に大幅に変動する不良確率を高精度で予測できない限り信頼性不良を制御できなくなる問題が非常に懸念されている。

本論文は、従来の不良確率予測手法の限界とその影響を定量化し、新手法の重要性を明確にした後、予測精度を向上させるための解析手法の提案を行いその改善効果をシミュレーションで定量的に確認することを目的としている。従来の手法が製造後に既知となりガウス分布で近似できる空間軸上のバラツキ(RDF)分布のみを考慮していたのに対して、本論文では、出荷後もRDFに比較してより大きく変動する時間軸上のバラツキ(RTN)を考慮可能にしたことで、今後のさらなるスケールング世代のVLSIの市場出荷前のスクリーニング設計やプロセス設計、回路設計のマージン設計に他に先行して適用可能にした点が、工学的意義として大いに評価できる。

時間軸上のばらつきRTN分布を新たに当該解析で取扱うことの困難性と重要性は、その分布が対数型のガンマ分布であり且つ裾がガウス分布であるRDFより長く、その精度が、時空間軸上を統合した全体の不良確率分布の裾の精度を支配する点にある。本論文では対数型の混合ガンマ分布の広範囲な確率分布(1~1/10<sup>12</sup>)を成分構成解析の容易性の観点から混合ガウス分布で過密部だけでなく稀な確率の裾部まで、満遍なく近似する各種手法を提案し従来手法の課題の明確化と課題の回避技術を提案しその効果をシミュレーションで定量化した。

さらに、本論文は、RDFとRTNの畳み込み計算で全体のバラツキ分布を予測する順方向問題と、全体の目標とする全体の不良確率分布から未知のバラツキ分布(RDF, RTN)を逆に予測する逆畳み込み計算(逆問題)の解析手法も研究対象として、MATLABの逆畳み込み用の埋め込み関数として使用されている複数のアルゴリズムが引き起こす課題を提示

	<p>しその解決技術を提案し、その効果をシミュレーションで定量化している。</p> <p>本研究の成果として、学術論文が 8 編（第一著者 8 編）と国際会議が 10 編（第一著者 8 編）として発表されており、関連分野の国際学会 (IEEK ISOCC2013) では IEEK の Best Paper Award を受賞している。本論文はそれらをベースにして、9 章から構成されている。本論文中には、研究の背景、目的、提案技術、有効性の検証データを明確に記述している。また、最終章では、本論文の結論と、今後の研究者として歩み出していく上で必要な当該分野における将来の研究課題や展望の見識が的確に且つ具体的に述べられている。以上の点から研究の工学的意義、提案技術の独創性の点は、学位論文として評価できるレベルに達していると認められる。</p> <p>&lt;最終試験報告書&gt;</p> <p>平成 27 年 1 月 22 日の学位論文公聴会においては、論文内容に関連する種々の工学的及び技術的な質問があったが、いずれも適切な回答を行うことができた。また公聴会後の最終試験においては、学位論文に関連する分野の学識を有し、今後研究を進めていくための研究能力を備えていることが判明した。</p> <p>以上の結果から、学位審査委員会はこの論文が博士（工学）の学位に適格であると判定した。</p>
<p>主な研究業績</p>	<p>参考論文 18 編 1 冊  (査読付き論文 8 編 うち第一著者 8 編)</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. "An RTN Variation Tolerant SRAM Screening Test Design with Gaussian Mixtures Approximations of Long-Tail Distributions",  Journal of Electronic Testing Theory and Applications., Vol.30, No.2,  pp.171-181 Mar. (2014), DOI 10.1007/s10836-014-5439-7, ISSN 0923-8174  Authors: <b><u>Worawit Somha</u></b>, Hiroyuki Yamauchi</li> <li>2. "An Adaptively Segmented Forward Problem Based Non-Blind Deconvolution Technique for Analyzing SRAM Margin Variation Effects",  Journal of Semiconductor Technology and Science, Vol.14, No.4, pp.365-375,  August (2014) DOI 10.5573/JSTS.2014.14.4.365  Authors: <b><u>Worawit Somha</u></b>, Hiroyuki Yamauchi</li> <li>3. "A Technique to Circumvent V-shaped Deconvolution Error for Time-dependent SRAM Margin Analyses",  IEIE Transactions on Smart Processing &amp; Computing, Vol. 2, No.4,  pp.216-225, August (2013), DOI 10.5573/IEIESPC.2013.2.4.216, ISSN 2287-5255  Authors: <b><u>Worawit Somha</u></b>, Hiroyuki Yamauchi, and Ma Yuyu</li> <li>4. "A Comparative Study on RTN Deconvolution of Richardson-Lucy and Proposed Partitioned Means for Analyzing SRAM Fail-Bit Prediction Accuracy",  International Journal of Computer and Communication Engineering, Vol. 3,  No. 3, pp.178-183, May (2014) , DOI: 10.7763/IJCCE.2014.V3.315  Authors: <b><u>Worawit Somha</u></b>, Hiroyuki Yamauchi</li> <li>5. " Adaptive Segmentation Gaussian Mixtures Models for Approximating to Drastically Scaled-Variou Sloped Long-Tail RTN Distributions",  International Journal of Future Computer and Communication, Vol. 2, No. 5,  pp.407-412, October (2013), DOI: 10.7763/IJFCC.2013.V2.195  Authors: <b><u>Worawit Somha</u></b>, Hiroyuki Yamauchi</li> </ol>

6. " A Discussion on RTN Variation Tolerant Guard Band Design Based on Approximation Models of Long-Tail Distributions for Nano-Scaled SRAM Screening Test ",  
International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol. 5, No. 4, pp.366-371, August, (2013), DOI: 10.7763/IJCEE.2013.V5.733  
Authors: **Worawit Somha**, Hiroyuki Yamauchi
7. " A Look up Table Based Adaptive Segmentation Gaussian Mixtures Model for Fitting Complex Long-Tail RTN Distributions ",  
International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing, Vol. 1, No. 3 pp.245-250, August, (2013), DOI: 10.7763/IJMMM.2013.V1.52  
Authors: **Worawit Somha**, Hiroyuki Yamauchi
8. "Fitting Mixtures of Gaussians to Heavy-Tail Distributions to Analyze Fail-Bit Probability of Nano-Scaled Static Random Access Memory",  
Advanced Materials Research Vol. 677 pp.317-325, February (2013), DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.677.317  
Authors: **Worawit Somha**, Hiroyuki Yamauchi, and Yan Zhang

**国際会議** 10編のうち第一著者8編

1. " Errors in Solving Inverse Problem for Reversing RTN Effects on VCCmin Shift in SRAM Reliability Screening Test Designs",  
IEEE The 27th international IEEE SoC (System-on-Chip) Conference (SOCC 2014) , Las Vegas USA, 2-5 September (2014) pp.318-323, DOI: 0.1109/SOCC.2014.(t.b.d)  
Authors: Hiroyuki Yamauchi and **Worawit Somha**
2. "A Technique to Solve Issue of Richardson-Lucy Deconvolution for Analyzing RTN Effects on SRAM Margin Variation ",  
5th IEEE Latin American Symposium on Circuits and Systems, Santiago, Chile, 25-28 February (2014), DOI 10.1109/LASCAS.2014.6820250  
Authors: Hiroyuki Yamauchi and **Worawit Somha**
3. "More Stable and Faster Convergence Algorithm for Solving Deconvolution Problem of Peak-Shifted Gamma Mixtures RTN Distributions ",  
The 29th International Technical Conference on Circuit/Systems Computers and Communications (ITC-CSCC), Phuket, Thailand, 1-4 July, 2014, pp.504-507  
Authors: **Worawit Somha** , Hiroyuki Yamauchi and Ma Yuyu
4. "Iterative and Adaptively Segmented Forward Problem Based Non-Blind Deconvolution Technique for Analyzing SRAM Margin Variation Effects",  
International SoC Design Conference (ISOCC), Phuket, Korea, 27-29 November, 2013, pp.184-187, DOI 10.1109/ISOCC.2013.6863967  
Authors: **Worawit Somha** , Hiroyuki Yamauchi and Ma Yuyu
5. "Blind Deconvolution Technique for Extracting Unknown Two Factors of RTN and Truncated RDF from Given Target for Overall SRAM Margin Variations",  
International SoC Design Conference (ISOCC), Phuket, Korea, 27-29 November, 2013, pp.188-191, DOI 10.1109/ISOCC.2013.6863968  
Authors: **Worawit Somha** , Hiroyuki Yamauchi and Ma Yuyu

6. "A Technique to Circumvent Problematic Deconvolution Processes in Time-dependent SRAM Margin Analyses ",  
International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology, 21-24 August, 2013, Bangkok, Thailand, pp.11-16,  
Authors: **Worawit Somha** , Hiroyuki Yamauchi and Ma Yuyu
7. "A Comparative Review of Deconvolution Errors in SRAM Margin Analyses between Algebraic and Optimization Problem Based Approaches ",  
International Conference on Engineering, Applied Sciences, and Technology, 21-24 August, 2013, Bangkok, Thailand, pp.60-65,  
Authors: **Worawit Somha** , Hiroyuki Yamauchi and Ma Yuyu
8. "A Discussion on SRAM Forward/Inverse Problem Analyses for RTN Long-Tail Distributions",  
IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI (ISVLSI 2013), 5-7 August, 2013, Natal, Brazil, pp.58-63, DOI 10.1109/ISVLSI.2013.6654623  
Authors: **Worawit Somha** , Hiroyuki Yamauchi and Ma Yuyu
9. "Convolution/Deconvolution SRAM Analyses for Complex Gamma Mixtures RTN Distributions",  
IEEE International Conference on IC Design and Technology, 29-31 May, 2013, Pavia, Italy, pp.33-36, DOI 10.1109/ICICDT.2013.6563297  
Authors: **Worawit Somha** , and Hiroyuki Yamauchi
10. "A RTN Variation Tolerant Guard Band Design for A Deeper Nanometer Scaled SRAM Screening Test: Based on EM Gaussians Mixtures Approximations Model of Long-Tail Distributions",  
IEEE 14th Latin American Test Workshop, 2-5 May, 2013, Cordoba, Argentina, DOI 10.1109/LATW.2013.6562687  
Authors: **Worawit Somha** , and Hiroyuki Yamauchi