

LSIの品質はどのように保証されるか？

真田 克

(受領日：2012年4月24日)

高知工科大学工学部 システム工学群
〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口185

E-mail: sanada.masaru@kochi-tech.ac.jp

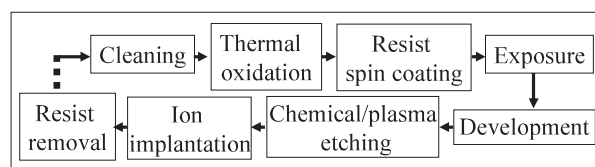
要約： Si基板中に異物を押し込み、熱を加えて膨張させ冷却するなど過酷なストレスを経ることでLSI (Large Scaled Integrated Circuit) は形成される。このようなLSIは欠陥の塊である。この欠陥を含むLSIの品質はどのように保証されるのか？バスタブ曲線と呼ぶ、時間経過に対する故障率の変化が示す3つの故障期(初期、偶発、磨耗故障期)に見られる特有の故障モードを基本に品質保証の考え方を示す。これら故障期はワイブル分布関数から算出される形状パラメータ値で判別できる。星の王子さまはキツネから「大切なことはみえないのだ」と教えられる。品質とは正常動作が当たり前とされる裏で維持管理される“みえない技術”によりもたらされるものであり、マネジメントそのものである。

1. はじめに欠陥ありき

LSIの製造はFig. 1に示すようにSiの単結晶基板上に生成した酸化膜上に写真現像に類似したプロセスでパターンを露光し、エッチングにより開孔部を設け、その孔を介してSi結晶内部に不純物と呼ぶ異種元素を注入することで拡散層を形成するプロセスであり、その繰り返しである。このように製造されるLSIは欠陥の塊といっても過言ではない。これらの過程から受けるストレスを製造技術でカバーすることでLSIが形成される。しかし、欠陥が内蔵されていることは事実であり、それらの形成位置がアクティブ領域のときは故障につながる。ではどれくらいの欠陥が存在するか。Fig. 2はLSIの配線に対してライトエッチングを用いてエッチピットと呼ぶ欠陥孔を顕在化させたSEM (Scanning Electron Microscope:走査型電子顕微鏡) 像であり、この製品の場合 $0.5\mu\text{m}/\Phi$ 以下サイズで約 10^5 個/ cm^2 と報告されている¹⁾。

このような欠陥に起因する故障を発生させないように対策がなされる。まず、初期段階で故障に至る欠陥は使用環境を加速する(高温度、高湿度、高電圧、温度サイクルなど)ことで劣化を早期に顕在化させ市場流出を防止している。そして市場にてLSIがほぼ一定の故障率のもとでの使用できるよう品質を保証している。しかし、どのようにスクリーニングしても欠陥は内蔵していると考えるべきであり、しばしば顕在化して市場で事故を発生させる²⁾。さ

らに、LSIは石器と呼ばれるほど安定した電子素子であるが、やはり駆動時間の経過とともに物理的・電気的ストレスにより磨耗し寿命となる。この時間経過において如何に保証期間を安定に使用できるかが品質保証である。



The process repetition induces defects.

Fig.1. LSI fabrication process forms into defects

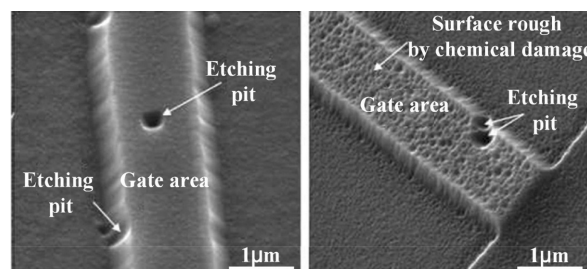


Fig. 2. SEM image of etching pit formed on metal line

本文はLSIの品質を保証するためのコンセプトと実施内容を紹介することを目的としており、品質確

保のために行う一連の作業や工程、および定量評価としての数理統計技術に関して述べる。まず、2章にてLSIが製造されてから全サンプルが故障となるまでの寿命の分布形状とその形状が示す特徴的な3つの故障期に関して説明する。3章にてLSIの品格と題した信頼性に関して、その定義をベースに保証内容を述べる。そして4章にてこれまで述べた記述上必要なアイテムに関して説明し最後にまとめを行う。

2. 諸行無常 “形あるものは壊れる”

“形あるものは壊れる”、石器として進化したLSIといえどもこの格言は当たっている。時間の経過に対する故障数の変化を表す寿命の分布形状から分類される3つの故障期の特徴とその評価内容を述べる。

2.1 寿命の分布形状³⁾

生命と同様、製品が製造されてからすべての製品が故障するまでの変遷を示したヒストグラム（任意の時間間隔 Δt とその間に発生する故障数の関係）をFig. 3に示す。この時間間隔 Δt を無限小にし、サンプル総数を100%と規格化した曲線は確率密度関数（Probability Density Function: pdf）と呼ばれ、 $f(t)$ として表わされる。

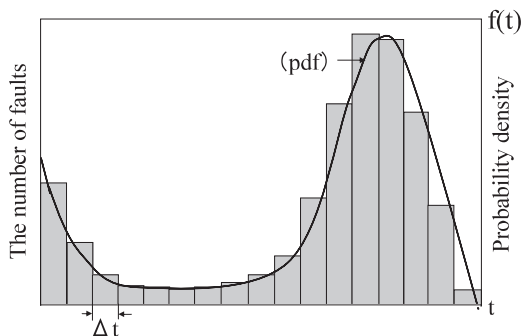


Fig. 3. Definition of Probability Density Function

次に、任意の時間間隔 Δt に対する累積故障数をプロットしたヒストグラムをFig. 4に示す。この時間間隔 Δt を無限小にし、累積総数を100%と規格化した曲線を累積分布関数（Cumulative Distribution Function: cdf）と呼ぶ。このcdf曲線は不信頼度（Unreliability）とも呼ばれ $F(t)$ として表される。また累積総数100%から $F(t)$ を引いた値（ $1-F(t)$ ）は正常品の割合を表し、信頼度（Reliability）と呼ばれ $R(t)$ として表される。

では、時間に対する故障数（fault ratio）の発生割合はどのように算出されるか。この割合はFig. 5に示すように確率密度関数 $f(t)$ における t から $t +$

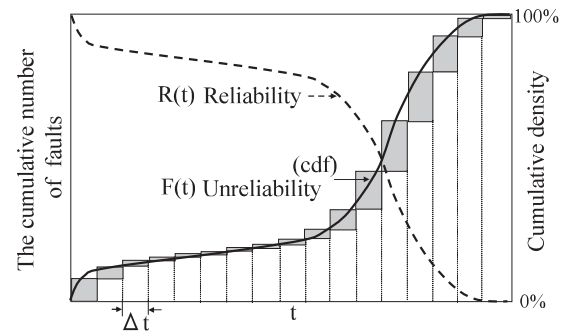


Fig. 4. Definition of Cumulative Distribution Function

Δt 間に発生した故障数の割合(A)を t 以降の正常品の割合(B)すなわち信頼度 $R(t)$ で割ったものとして示される。そして、 $\Delta t \rightarrow 0$ とすることで故障率 ($\lambda(t)$) として表わされる。

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{A}{B} \right) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1)$$

$$\left(\text{ただし } R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \text{ である} \right)$$

ここで上式を展開し、整理すると

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{\int_t^{\infty} f(t) dt} = - \frac{d}{dt} \left(\ln \int_t^{\infty} f(t) dt \right) \quad (2)$$

となる。この式を0から t まで積分すると

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt = e^{-\int_0^t f(t) dt} \quad (3)$$

として $R(t)$ が求まる³⁾。

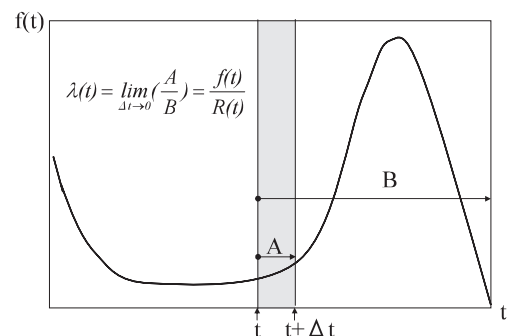


Fig. 5. Illustration for fault ratio detection

この故障率 $\lambda(t)$ と時間 t の関係は故障率曲線として表示され、この曲線をバスタブカーブ（Bathtub curve）と呼ぶ。バスタブカーブはFig. 6に示すように3つの特徴的な形状に分類され、これらは時間順に、初期故障期（Early Fault Period: EFP）、

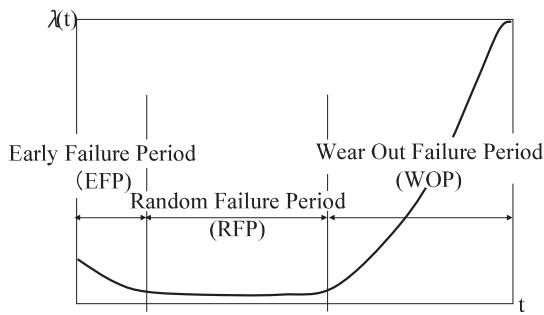


Fig. 6. Three fault periods indicated by bathtub curve

偶発故障期 (Random Fault Period: RFP)、摩耗故障期 (Wear Out Period: WOP) と呼ばれる。

2.2 3つの故障期

バスタブカーブが示す3つの故障期に関して特徴と評価内容を述べる。

2.2.1 初期故障期 (Early Fault Period: EFP)

EFPは欠陥を作り込まれたLSIにストレスを印加することで不良品を出し尽くす期間である。この期はTable 1に示すように、製品を市場に出荷する前のスクリーニング期にあたる。そして欠陥に起因する故障が出尽くしていくことにより故障率は時間と共に低下していく。さらに、ストレスを加えることにより動作が滑らかになる“ならし動作”としての効果も持つ。そのため全数のストレス印加が原則となる。この期はEFP全体に対する故障率を考慮するためppm (parts per million: 1/10⁶) という尺度を用いる。

Table 1. Characteristic of early fault period

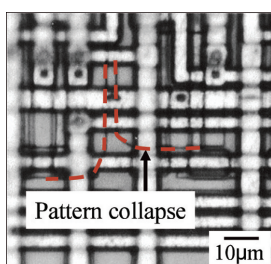
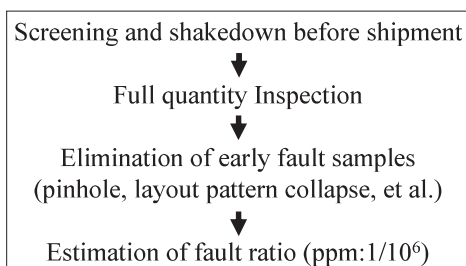


Fig. 7. OpM image of pattern collapse

この期の欠陥故障にはピンホールやパターン崩れなどがある。Fig. 7はOpM (Optical Microscope: 光学顕微鏡) で観察したパターン崩れ欠陥である。

2.2.2 偶発故障期 (Random Fault Period: RFP)

RFPは欠陥起因の故障が出尽くした安定期であり故障率はほぼ一定である。この期はTable 2に示すように出荷後のトレース期にあたり、サンプルの抜き取り試験により安定性が評価される。REPで発生する故障は使用時の外部環境から影響を受ける間欠的な故障である。Fig. 8は外部環境に起因した故障の割合を示す分布図であり、ほとんどが過電圧 (Electrical Overstress: EOS) や静電気 (Electrostatic Discharge: ESD) による故障である⁴⁾。Fig. 9は外部起因の故障の1/2を占めるESD破壊箇所のOpM像である。さらに、EFPでのスクリーニングを免れた軽い欠陥が経年変化で成長し故障として発覚することもある。そのため、抜き取り試験による良品解析 (後述) と呼ぶ欠陥や異常の有無を調べる検査が実施される。ロットに共通の重大欠陥が発覚した時は全数回収となる。また、この期の故障率は総試験総数 (ロット毎の抜き取りの総数 x 試験時間 (hr)) に対する故障割合をポアソン分布関数にもとづいて算出される。そのため、単位はFIT (Failure unit: 1hrあたり10⁹個中1個の故障が発生した場合1FITという) を用いる。

Table 2. Characteristic of random fault period

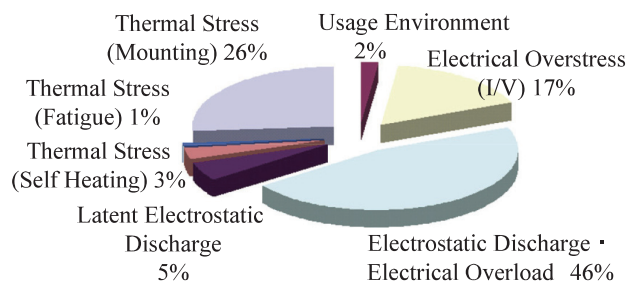
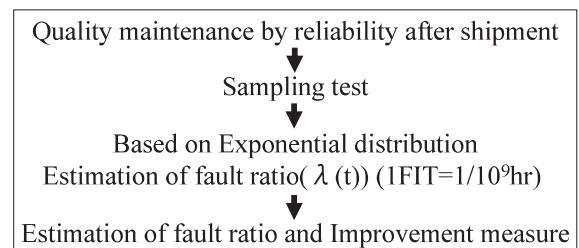


Fig. 8. Distribution of fault mode caused by outer environment

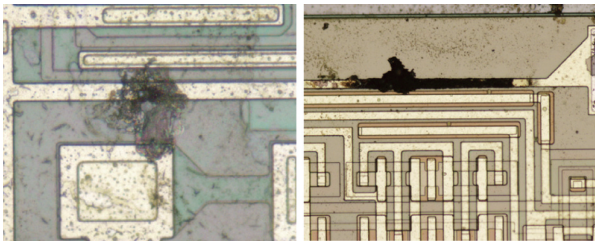


Fig. 9. OpM image of ESD damage

2.2.3 摩耗故障期 (Wear Out Fault Period: WOP)

WOPは材質や構造体の劣化や破断による故障期であり、これらの発生によりLSIは寿命となる。寿命の要因は拡散、配線、絶縁体の材料および、それらの組み合わせ、そして設計基準と多義にわたる。これらの要因は時間の経過とともに劣化し突然故障となる。そのため寿命の評価にはTEG (Test Element Group) (後述) と呼ぶ要因別に設計、製造されたテストサンプルが用いられる。TEGは加速した動作環境により短時間で試験される。故障品は原子や分子レベルでの物理解析・分析技術を用いて解析される。そして発生メカニズムが分析され、劣化対策につなげられる。Table 3はこの期の事前評価の流れを示す。Fig. 10は代表的な故障モードであるEM (Electro Migration) 故障 (後述) の例である。

Table 3. Characteristic of wear out fault period

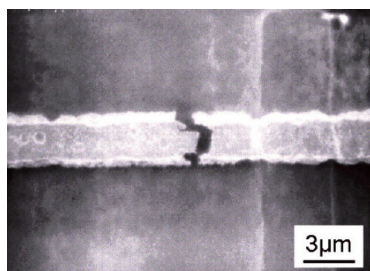
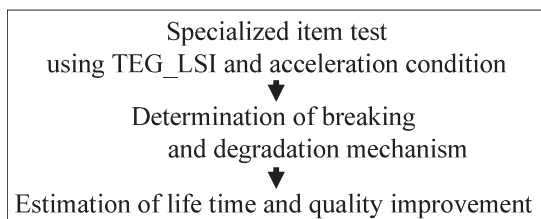


Fig. 10. SEM image of EM fault

以上、故障率 $\lambda(t)$ と時間 t の関係を示すバスタブカーブが示唆する3つの故障期に関して特長を述べた。ではこれらの特徴を対策する各種の品質技術に関して以下に述べる。

3. LSIの品格

JISによれば信頼性とは「アイテムが与えられた条件で規定の期間中、要求された機能を果たすことができる性質」とあまり味の無い定義をしている。すなわち、Table 4に示すように「与えられた条件」とは使用環境である。「規定の期間」とは出荷した製品が規定した正しい使用環境の下で動作することを保証する期間であり、故障率と信頼度で表示される。「要求された機能」とは動作条件を加味した機能の保証である。そのため動作保証はパッケージ (Package : PKG) に搭載されたLSI全体に対して、機能保証はLSIを構成するTr、配線といった各エレメントに対する評価による保証となる。これらの保証が品格につながるのである。

Table 4. Definition of reliability and it's interpretation

Reliability	Evaluation item
Under specified requirement	
└ During the prescribed period : Operation certificationLSI
└ Requested capability : Function certificationElement

3.1 機能保障

規定期間の動作保証は市場での安定的な動作の保証である。そのためTable 5に示すように、EFPでの全数スクリーニングによる欠陥品の収束、埋もれた欠陥を顕在化させるための良品解析、環境試験によるLSI全体の製品として評価が実施される。

Table 5. Operational certification in stipulated period

For operational certification	
└ Screening (Full quantity Inspection)	in shipment field
└ Observational analysis of normal sample	
└ Environmental test	

3.1.1. スクリーニング

スクリーニングの目的は欠陥品の除去とストレスによる動作特性の安定化 (なじみ処理) であり、全

数に対して行われる。この処理は正常品を劣化させることなく欠陥品のみを選別する加速条件や試験時間の検討が必要である。判定情報として論理と電流がある。通常は出力端子における論理判定が一般的である。この工程で検出された不良品はランダムな故障か、ロットに共通の故障かを識別するために故障解析がなされる。後者の結果は設計・プロセス・製造にフィードバックされる。

3.1.2 良品解析

故障解析は故障が発覚した時点でなされるが、一方で正常品と思われるLSIを解析する良品解析がある。これにはOpMやSEMを用いてLSI全体の外観検査および、FIB (Focused Ion Beam:集束イオンビーム顕微鏡) や断面研磨機を用いてLSIチップのパターン側面を出すことで形状を観察する断面の検査がある。この観察は将来故障につながると予想される欠陥を検出することを目的としている。検出した欠陥が深刻な共通欠陥のときはロット全体の回収が行われる。また、スクリーニングのための加速試験条件が設定される。このような良品解析はまさに信頼性品質を補完する技術である。Fig. 11は良品解析にて検出した欠陥例である。(a)は一過性の欠陥と判定した例であり、左図は下層配線のパターン残り右図はコンタクト部のパターン崩れである。(b)は共通欠陥として判定された配線上に発生したボイドであり、経時劣化により断線に至る深刻な欠陥である。

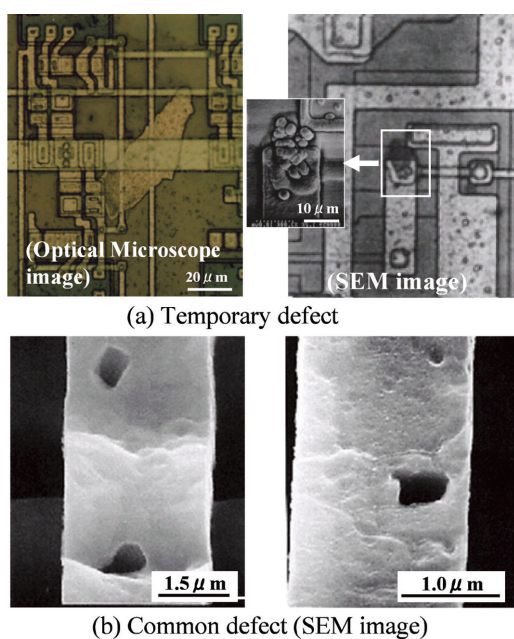


Fig. 11. Defects image by normal sample's analysis

3.1.3 環境試験

環境試験は実装封止されたLSIに対してなされる。この試験における加速項目は温度、湿度、機械的ストレスなどである。温度と湿度に起因する故障は電気化学的な反応による金属の異常成長でありショート故障となる。加速試験では中々再現しないが、発生するとロット全体に関わるため大きな市場故障となる。このショート故障にはFig. 12に示す(a)ウィスカ (Whisker) や(b)デンドライト (Dendrite) がある。また、フィラー (filler) と呼ぶモールド樹脂材に含まれる吸湿防止材 (SiO₂片) が樹脂の収縮過程でLSI表面にストレスを加え、配線に亀裂を発生させた欠陥がある (Fig. 12(c))。これは経時劣化により断線に至る。対策はLSI表面にポリイミド (Polyimide) 樹脂を塗布することで防止している。

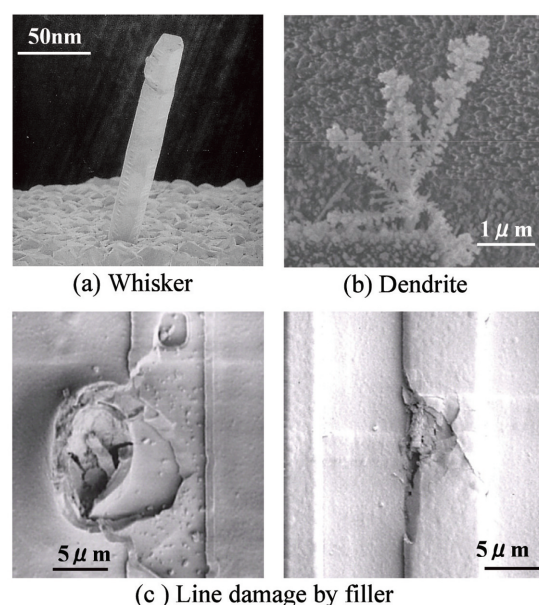
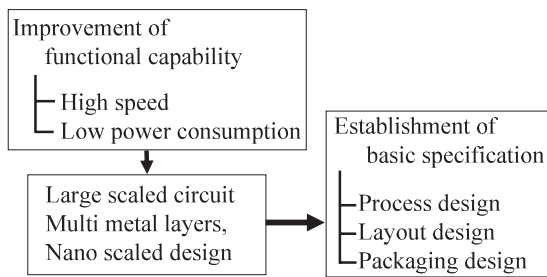


Fig. 12. SEM image of defects detected by environment testing

3.2 機能保証

高速化、低消費電力化を目指すLSIの進展に対して、スケーリング則に見られる微細化、大規模化、多層配線構造化などの技術開発が不可欠である。さらに新たな故障モードの顕在化による新規部材の開発や選定を行わねばならない。これらの検討結果はプロセス・レイアウト・実装設計における基本スペックとして確立される (Table 6)。この機能保証を確保するためのコストと工数は年々膨大なものとなってきている。

Table 6. Assurance flow of functional capability



3.2.1 高速化

高速化の進捗は信号の立ち上がり (t_{PHL}) や立ち下がり (t_{PLH}) 特性を急峻にしてきており、その数十倍の周波数を保証しないと正確な信号伝播ができない⁹⁾。この高速化により派生するいくつかの問題点をFig. 13に示す。① psオーダで切替わるときのキャリアの供給は外部電源からは困難で主に回路内に寄生容量からの供給となる。この現象は電源ノイズの発生源となる。② 大規模化に伴う I_{DDT} (Transient current:論理の切替り時に流れる過度電流) は数十Aオーダとなるため、配線の寄生素子 (R, L) により大きな電位ドロップが発生する。この現象は内部電源間のバラツキの原因となる。③ さらに高速動作は配線間の容量カップリングによる信号の漏れが発生し信号伝搬に影響を与える。これはクロストーク (Cross talk) と呼ばれる。以上、機能を保証する上でこれらの問題は回路・レイアウト上の制約を伴う。そのためTEGを用いた事前検証で設計スペックを確立することになる。これらは動作保証であると同時に各エレメントに対する機能保証でもある。

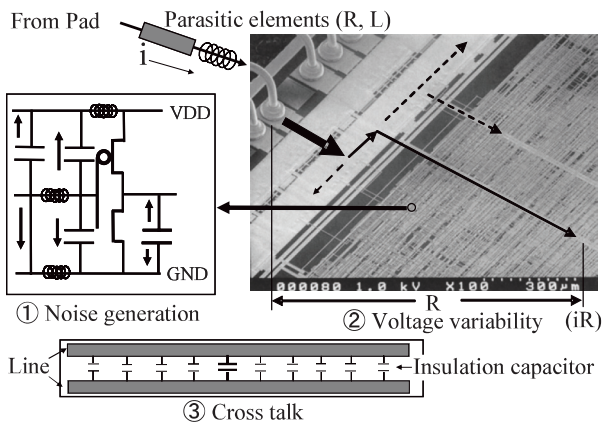


Fig. 13. Problems brought by high speed operation

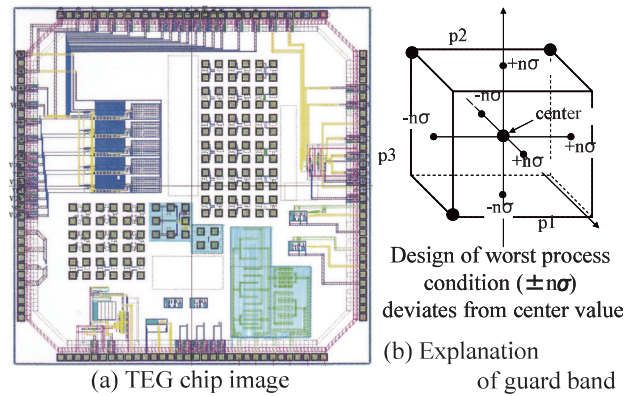


Fig. 14. Illustration of TEG chip and guard band

3.2.2 TEG (Test Element Grope)

LSIを構成する各エレメント評価のためにTEGと呼ぶパターンを搭載したテストチップが用いられる (Fig. 14(a))。この目的はプロセス、素子のばらつきおよび、材料の検討と、設計パラメータ値の設定である。後者の設定には“ガードバンド (Guard band)”と呼ぶ設計・製造パラメータを $\pm n\sigma$ (σ は偏差値であり、 n は3から6の係数が設定される) に振ったワースト帯域が設けられる (Fig. 14(b))。そして、これらの帯域内でも正常に動作するための設計パラメータ値が評価され、設定される。

3.3 微細化

微細化に伴う故障には配線、絶縁体 (酸化膜)、デバイス構造などに起因する故障モードがある。これらのモードは加速試験にて評価される。そして、発生メカニズムの究明、対策の検討、故障率や寿命の算出が為される。以下に、配線故障とゲート酸化膜故障について述べる。

3.3.1 配線故障

配線の代表的な故障にはEM (Electro Migration) とSM (Stress Migration) がある。

EMは電子との衝突による金属原子の移動現象である。Fig. 15に示すように金属結晶中の原子は熱エネルギーによる格子振動を行っている。この原子はクーロン力 (F_c) と同時に反対方向に電子 (e) との衝突による力 (F_e) ($F_c \ll F_e$) を受ける。電子流方向に結晶粒界が存在するとその粒界の空孔に原子が入り込む。この空孔と隣接原子間の障壁のエネルギーを活性化エネルギー (E_a) と呼ぶ。この連鎖はFig. 16(a) に示すように金属移動箇所を中心にボイド (void) を発生させ断線に至らしめる。移動した原子は堆積してヒロック (hillock) を発

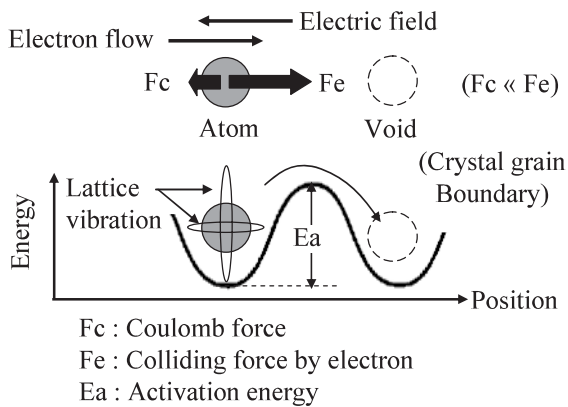


Fig. 15. EM generation mechanism

生させる。この現象は配線中の結晶粒界に集中するため配線幅より小さい粒界をもつ配線に多発する。Fig.16(b)はTEM (Transmission Electron Microscope:透過型電子顕微鏡) で見た配線の結晶粒界 (Crystal grain boundary) の像である。配線幅に対する結晶粒界のサイズは平均1/3はぐらいである。スケージング則でみると縮小率が1/k倍となると電流密度は k^2 倍となることからEMの影響度は増大する。更に、多層配線構造化は異なる金属間接続を有するViaにおいてEM故障は深刻化する。

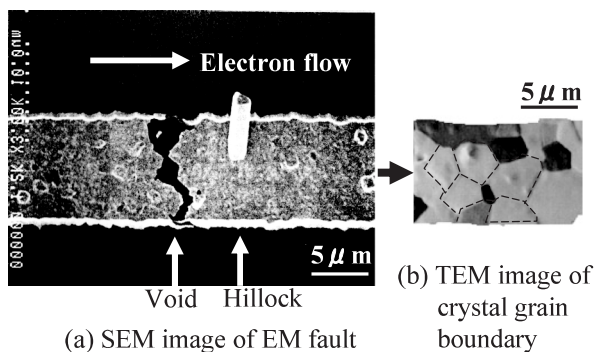


Fig. 16. Fault example of Electro Migration(EM)

SMはLSIを放置しているだけで配線に亀裂が生じる現象である。この原因は配線形成後の冷却過程においてそれを囲む絶縁体との熱膨張係数の違いから配線が引張り応力を受け、それを緩和するために配線原子が移動する現象である。Fig. 17(a)は鋭い亀裂が生じた配線の断面SEM像である。半端な亀裂はその箇所電界が集中することで通電時にEM現象を発生させ故障に至らせる。Fig. 17(b)は配線の断面TEM像であり、配線幅より大きな結晶粒界

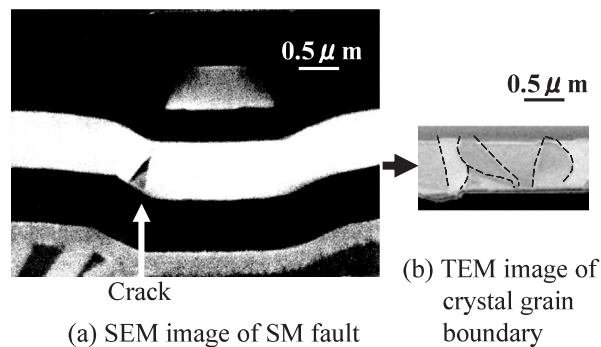


Fig. 17. Fault example of Stress Migration(SM)

をもつバンブ (Bamboo) 構造と呼ぶ配線に顕著となる。

対策はFig. 18に示すように配線 (Al-Si) の上下間を高融点金属 (TiN) で挟んだサンドイッチ構造にすることであり、これにより配線にEM, SMによる断線が発生しても上下層の金属を介してバイパスが形成されるため動作故障には至らない。

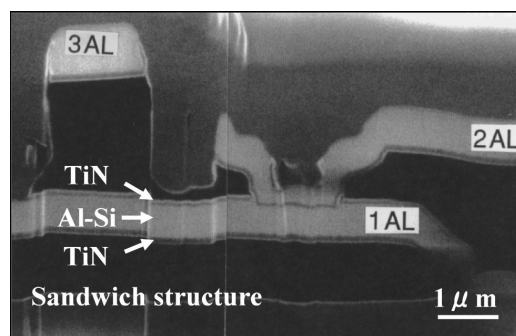


Fig. 18. Cross section SEM image of sandwich structure for countermeasure of EM, SM

3.3.2 ゲート酸化膜故障

ゲート酸化膜故障にTDDB (Time Dependent Dielectric Breakdown) と呼ぶ時間経過と共に絶縁破壊となる故障がある。これは微細化と共にゲート酸化膜が薄くなると印加されるゲート電圧によりリーク電流が増加し、最終的に絶縁破壊に到る故障である。このモードは酸化膜中の欠陥の形成状態によりスクリーニングにより容易に顕在化するEFP故障と、経時劣化により故障となるWOP故障に分類される。Fig. 19はワイブル確率紙を用いてプロットした寿命形状から識別されたEFP ($m \approx 1.0$) とWOP ($m=3.3$) の故障例である (後述)。

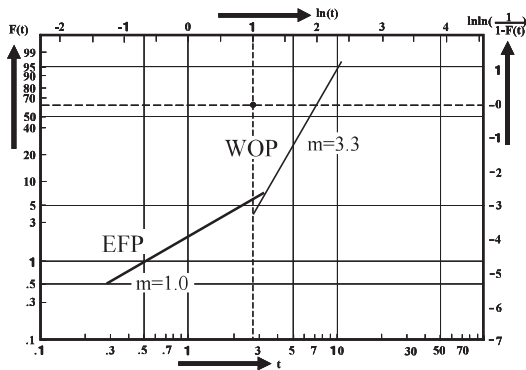


Fig. 19. Two kinds of TDDB faults plotted on Weibull probability paper

TDDBメカニズムはFig. 20に示すようにパーコレーション (Percolation) モデルが知られている。これは電界印加によるトンネル電流が酸化膜中に欠陥を連続的に誘起していくことで短絡させる、まさに浸透という意味に相応しいモデルである。Fig. 21にゲート酸化膜破壊の解析事例を示す。スケーリング則による1/k倍の縮小率に対して、酸化膜厚は1/k倍、電圧も1/k倍であるが、微細化に伴う実際の電圧縮小率はほとんど低電圧化できず2005年を境にほぼ一定である。従って電界強度はk倍となり平均寿命は大幅に短縮する結果になる。対策としてEOT (Evaluation Oxide Thickness) に基づくゲート酸化膜のHigh-k化 (高誘電率化、Hf系が用いられている) により膜厚の縮小率を緩和する方が採られている。

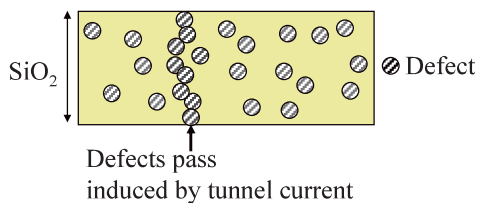


Fig. 20. Illustration of Percolation model

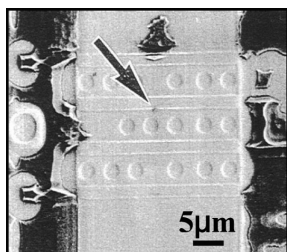


Fig. 21. SEM image of TDDB defect on gate SiO₂

以上、品格を保つための基本となる信頼性は正しい使用環境の下で規定の期間、規定の中の機能条件で動作を保証することを意味し、そのための動作保証と機能保証と分けて述べたが本質は一体である。実施した試験より顕在化した故障は物理解析により原因を究明することで品格の向上に貢献できることを述べた。

4. 品格の「見える化」への道

各保証工程での試験結果は品格の顔を「見える化」しなければならない。まず、「見える化」の前提となる加速試験モデルについて述べる、次に、簡易なデータ解析手法であるワイブル分布とその応用について述べる。

4.1.1 加速試験

加速試験における加速アイテムはFig. 22に示すように温度(T)、電圧(v)、電流(i)、湿度(RH)などがある。温度加速にはアレニウスモデルが、電圧、電流、湿度加速を追加したモデルにはアイリングモデルが一般的であり、経験則にもとづいた式が実用化されている。試験はJIS規格、MIL規格で規定された試験条件のもとで実施される。

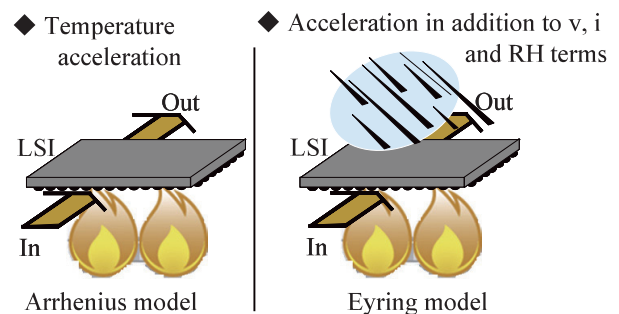


Fig. 22. Illustration of acceleration test

<アレニウスモデル (Arrhenius model) >

温度加速はアレニウスモデルが実用化されている。このモデルは分子構造を対象とするため気体におけるボルツマン分布を基本とする。

$$n = A \cdot \exp\left\{-\left(\frac{E}{kT}\right)\right\} \quad (4)$$

(n : 分子数、E : エネルギー、k : ボルツマン定数、T : 温度)

正常から異常へ変化する劣化量をΔn、劣化速度をv、活性化エネルギーをEa、時間をt とおくと

$$v = \frac{\Delta n}{t} \propto \exp\left\{-\left(\frac{E_a}{kT}\right)\right\} \quad (5)$$

の関係がある。従って 寿命(L)は

$$L = \frac{\Delta n}{v} \propto \exp\left(\frac{Ea}{kT}\right) \quad (6)$$

となり

$$L = A \cdot \exp\left(\frac{Ea}{kT}\right) \quad (7)$$

と表示される。これがアレニウスモデルである。さらに、このモデル式を変形すると活性化エネルギーが求まる (Fig. 23(a))。

$$\ln(L) = \frac{Ea}{kT} + A' \quad (8)$$

<アイリングモデル (Eyring model)>

温度に電圧、電流 (g(v, i)) および、湿度 (f(RH)) 条件を加えたモデルは

$$L = A \cdot \exp\left(\frac{Ea}{kT}\right) \cdot g(v, i) \cdot f(RH) \quad (9)$$

と現せる。これら追加項 g(v,i), f(RH) の各々は経験的にべき乗則として近似される。従って、寿命 L は追加項を S と記述すると基準ストレス S₀ に対するストレス比 (S/S₀) に対して

$$L = \left(\frac{S}{S_0}\right)^{-n} \quad (10)$$

と表示される。この式を変形すると加速係数 n が求まる (Fig. 23(b))。

$$\ln L = -n\left(\frac{S}{S_0}\right) + A \quad (A: const.,) \quad (11)$$

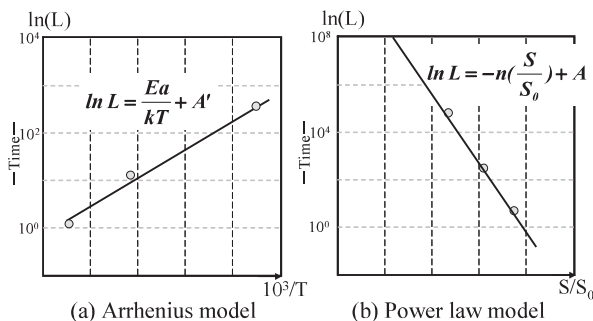


Fig. 23. Illustration of acceleration stress model

4.1.2 ワイブル分布 (Weibull Distribution)

ではこのような加速試験による劣化がどの故障期

にあたるか? この判定は故障を分類する上で重要である。そして、この判定にはワイブル分布を用いた統計解析が実用化されている。ワイブル分布関数は鎖の劣化を数式化した経験則に基づく式であり、m : 形状パラメータ、η : 尺度パラメータ (寿命に関係)、γ : 位置パラメータ (故障発生時に関係) と呼ぶ3つの指数からなる確率密度関数 f(t) である。

$$f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left\{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^m\right\} \quad (12)$$

そして、このm値が故障期を決定する重要なパラメータとなる。故障の発生時からの分布を見るため γ=0 とおき、η=1 と規格化したときのワイブル分布関数のm値を変化させた分布形状に対する寿命の分布形状 (2章参照) との比較を行う。Fig. 24は確率密度関数 (pdf) f(t) でみたワイブル分布(a)と寿命の分布形状(b)の比較を、Fig. 25は信頼度関数R(t)での比較を、Fig. 26は故障率λ(t)での比較を示す。この結果、m<1はEFP、m=1はRFP、m>1はWOPを現わすことが判る。Table 7に上述したワイブル分布関数と寿命の分布関数のパラメータ値の対比を示す。

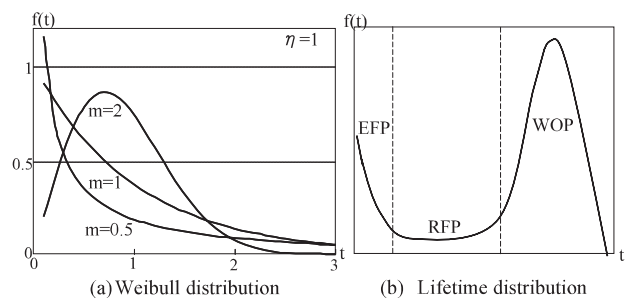


Fig. 24. Comparison of pdf(f(t)) between Weibull and lifetime distribution

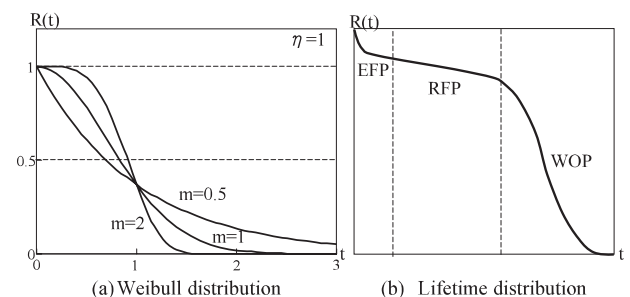


Fig. 25. Comparison of reliability (R(t)) between Weibull distribution and lifetime distribution

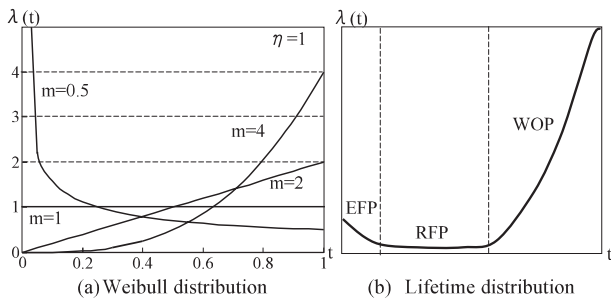


Fig. 26. Comparison of fault ratio($\lambda(t)$) between Weibull distribution and lifetime distribution

Table 7. Confrontation of parameters between weibull distribution and lifetime distribution

(a) Weibull Distribution	(b) Lifetime Distribution
$f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right\}$	$f(t) = \lambda(t) \exp\left\{-\int_0^t \lambda(t) dt\right\}$
$R(t) = \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right\}$	$R(t) = \exp\left\{-\int_0^t \lambda(t) dt\right\}$
$\lambda(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1}$	$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$

以上、期間の判定やパラメータを算出について述べたがこれらの指標を簡易に取り出せるツールとしてワイブル確率紙（縦軸： $\ln\ln\{1/(1-F(t))\}$ 、横軸： t 又は $\ln(t)$ ）がある（Fig. 19参照）。

$$\ln\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right) = \ln\ln\left(\frac{1}{R(t)}\right) \quad (13)$$

$$= m \cdot \ln(t) - m \cdot \ln(\eta)$$

故障数と時間毎の累積故障数をプロットすることで容易にm値を算出でき、故障期を判定できる。

4.1.3 指数分布

ワイブル分布関数におけるm=1は出荷後の安定期であるRFPでの品質を現し指数分布となる。Table 8に指数分布におけるパラメータを示す。

Table 8. Parameter of exponential distribution

$$f(t) = \left(\frac{1}{\eta}\right) \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)\right\}$$

$$R(t) = \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)\right\}$$

$$\lambda(t) = \frac{1}{\eta}$$

指数分布より算出される平均故障時間（MTTF: Mean Time To Failure）は

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{1}{\lambda} = \eta \quad (14)$$

となる。これはRFPにおける正常品の割合が37%となったときの時間に相当する。また、正常品が半分となるメジアン寿命（Median life） t_{50} は

$$R(t_{50}) = 0.5 \quad \text{より} \quad t_{50} = \eta(\ln 2)^{1/m} \quad (15)$$

として算出される。これはRFPにおける正常品の割合が70%になったときの時間に相当する。これらMTTFと t_{50} はRFPの品質を保証する重要なパラメータである。以上の関係をFig. 27に示す。

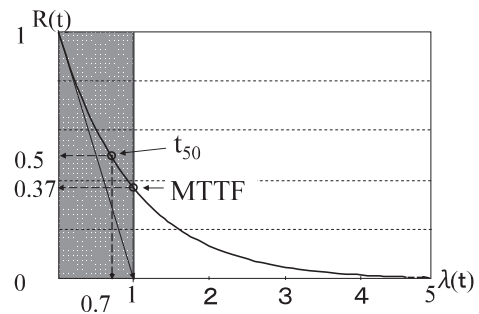


Fig. 27. Relation between MTTF and t_{50} on RFP

4.1.4 信頼度と故障率

LSIの信頼度R(t)と故障率 $\lambda(t)$ の関係をみる。
<信頼度>

LSIの構成を簡単に拡散（Diffusion: D）、配線（Line: L）、組み立て（Assembly: A）とした各々の信頼度を R_D 、 R_L 、 R_A とするとトータルの信頼度 R_{total} はこれらの積算した値となる。

$$R_{total} = R_D \cdot R_L \cdot R_A \quad (16)$$

この積算系はFig. 28に示すように直列系と呼ばれる。

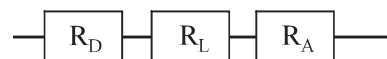


Fig. 28. Series system

例えば $R_D=R_L=R_A = 0.99$ とおくと
 $R_{total} = 0.99^3 = 0.97$

と一応健全な信頼度を得る。
しかし工程数が100となると信頼度は

$$R_{total} = 0.99^{100} = 0.37$$

というとんでもない値になる。このことは多数の工程を有するLSIでの作り込みを如何に確実に実施しなければならないかを教えている。

<故障率>

信頼度Rと故障率λの間には

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(x) dx} \quad (17)$$

となる関係があるため

$$R_{total}(t) = e^{-\int_0^t \lambda_D(x) dx} e^{-\int_0^t \lambda_L(x) dx} e^{-\int_0^t \lambda_A(x) dx} \quad (18)$$

となりトータルの故障率λ totalは

$$\lambda_{total} = \lambda_D + \lambda_L + \lambda_A \quad (19)$$

と和の関係が成立する。この式は1個でも大きな故障率を有するプロセスが存在するとLSI全体がこのプロセスに影響され重大な品質低下につながることを意味している。

以上、品格の「見える化」に関して述べた。加速試験におけるデータ解析をワイブル分布表示させることで故障期の判定、各故障期での故障率や寿命パラメータなどの算出が容易となる。この定量化はまさに品質の視覚化を意味するものである。

5. まとめ

品質とは製品が持つ品格である。これは安全学の権威である向殿先生（明大）が紹介された格言である。明治期、来日した西欧人は清貧の中に礼儀正しい人々を見て「尊厳と品格」を感じたとある。そして、この品格が日本の製造業に引き継がれてきているのである。

Si結晶を加工した石器としてのLSIは壊れない電子デバイスとして進化してきた。しかし過酷な製造条件で作られる欠陥は完全には取り除けない。品質はこの欠陥との戦いである。すぐに顕在化する欠陥もあれば、徐々に成長していく欠陥もある。技術者はこれらの欠陥に対して種々の技術や評価法を開発することで素晴らしい品格を作り上げてきた。星の王子さまはキツネから「大切なことはみえない

のだ」教えられる⁶⁾。品質とは正常動作が当たり前とされる裏で維持管理される“みえない技術”によりもたらされるものであり、マネジメントそのものである。

最後に本文は“やさしく”を基本に図を多用することを心がけた。使用した写真や図は多少古く、また現在大学内で用いているLSIの解析、設計資料であり、DSM化した最近のLSIに対応できていない。しかし現象やイメージを掴んで頂くためにあえて使用した。記述において一般性を重んじたため当てはまらない箇所があることは否めないことをお断りしておく。

文献

- (1) 植木武美、“半導体商社における電子デバイスの品質支援と各種解析サービス”、REAJ、Vol.32、No.72、pp.484-491 (2010)
- (2) 眞田克、“電源電流を用いたLSI評価法は再びよみがえるか?”、REAJ、Vol.32、No.7、pp.498-507 (2010)
- (3) 鈴木和幸、“半導体デバイスの信頼性基礎講座—(1)信頼性の基礎数学—”、REAJ、Vol.29、No.4、pp.242-245 (2007)
- (4) 今井康雄、“電子デバイス・モジュールの最新評価技術”、REAJ、Vol.32、No.72、pp.478-483 (2010)
- (5) 高木範明、“半導体技術の急激な進歩が一信頼性保証に与える影響” REAJ、Vol.26、No.4 pp.300-315 (2004)
- (6) サン=テグジュペリ (訳 池澤夏樹) 絵本「星の王子さま」 集英社
(以降の文献は本文全体に渡り参考にした)
- (7) LSIテストハンドブック、LSIテスト学会編 オーム社 (2008)
- (8) 大村平著、「信頼性工学のはなし」日科技連 (1988)
- (9) 信頼性110番シリーズ2「デバイス・部品の信頼性試験」日科技連、(1992)
- (10) 二川清著、「信頼性技術叢書 故障解析技術」日科技連 (2008)
- (11) 鈴木和幸 編著、「信頼性技術叢書 信頼性データ解析」日科技連 (2009)
- (12) <http://japan.renesas.com/>、「信頼性ハンドブック」ルネサスエレクトロニクス

How is the Quality of LSI Guaranteed?

Masaru Sanada

(Received: April 24th, 2012)

Faculty of System Engineering, Kochi University of Technology
185 Tosa-yamada Miyanokuchi, Kami, Kochi JAPAN

E-mail: sanada.masaru@kochi-tech.ac.jp

Abstract: After exposure to numerous severe stresses, such as diffusion and implantation of impurity atoms in Si substrate, and thermal expansion and compression in it, LSI (Large Scaled Integrated Circuit) is fabricated. The LSI is a lump of defects. How is the quality of the LSI guaranteed? Policy of quality assurance is introduced based on each defect mode of three fault periods indicated by bathtub curve. The failure periods are judged by shape parameter value drew from Weibull distribution function. “L’essential est invisible pour les yeux” the little prince is taught from fox. Quality brought by the invisible exertion is management itself.