IGBTの信頼性と品質

AND9058/D

はじめに

現在の半導体市場で、企業が成功するための2つの重要な要素は、製品の品質と信頼性です。両者は相関関係にあります。信頼性は、製品の予想寿命にわたって品質が維持されることを意味します。どのメーカも事業を継続するために、製品が品質と信頼性に関する基本的な標準を満たしているか、それを上回っていることが必要です。オンセミ(**onsemi**)は半導体メーカとして、最も不利な環境でも動作するように、最も条件の厳しいアプリケーションを想定した製品を供給することで、これらの標準を満たすことに成功しました。

保証された品質性能を達成するには、従来の「テストイン」品質から離れて、「デザインイン」品質という新しい概念を採用することが最良の方法であると認識されています。オンセミでは、品質と信頼性に関して最終的に到達可能なレベルを実現するために、二段構えのアプローチを使用しています。第一に、高信頼性という特性を内在するプロセスを開発し、実装します。次に、最初から最後まで、工程のあらゆるステップでプロセスの仕様に従うために、細心の注意を払います。これにより、検査および手順の策定と適用を通じて、隠れていた潜在的な故障モードを明らかにすることができます。長期的な信頼性を確保するためのこの集中的な取り組みは、最終的に「完成度の高い製品」の製造につながります。

オンセミは、品質と信頼性に関する4ステップからなるプログラムを推進することで、IGBT製品の信頼性における理想に近づきます。

1. プロセス内の厳格な制御と検査
2. 包括的に評価された設計と材料
3. 100% QA冗長試験を含むプロセス平均テスト
4. 監査と信頼性研究を通じた継続中の信頼性検証

品質と信頼性に関するこれらの手順を、厳格な受け入れ検査や出荷品質管理検査と組み合わせることで、加工前のシリコンから提供されるサービスまで、品質が造り込まれた製品を作り上げることができます。

信頼性試験

オンセミのIGBTは、準拠を検証するための一連の包括的信頼性試験の対象となります。これらの試験は、実用アプリケーションで発生した故障のメカニズムを加速するように設計されており、「実際の」アプリケーションで満足できる信頼性性能を保証することができます。

以下に、オンセミのIGBTに対して定期的に実施されている信頼性試験を示します。

高温逆バイアス(HTRB)

HTRB試験は、メイン・ブロッキング接合部が高温下で「逆バイアス」条件に置かれたときに、デバイスの安定性を時間の関数として確認するように設計されています。

接合部全体に印加した特定の温度と電圧に対する時間経過に伴う安定性とリーク電流が、接合部表面の安定性の指標です。したがって、この結果はデバイスの品質と信頼性に関する良好な指標になります。

IGBTの場合、コレクタ−エミッタ間に電圧を印加し、ゲートをエミッタに短絡します。I_{CES}、$V_{(BR)CES}$、I_{GES}、$V_{GE(th)}$、および$V_{CE(on)}$が、監視対象のDCパラメータです。消費電力が原因でデバイスの熱暴走を引き起こすような高レベルのリークが観察されたとき、故障が発生したと判定します。安定したデバイスのリーク電流は比較的安定した値にとどまるはずであり、テスト期間全体にわたってわずかしか増加しません。

代表的条件：

V_{CE} = 最大定格の80〜100%
V_{GE} = 0 V (短絡)
T_A = 150°Cまたは最大Tj
持続時間： 認定のために1,000時間

高温ゲート・バイアス(HTGB)

HTGB試験は、高温で最大定格DCバイアス電圧をゲート酸化物に印加して電気的ストレスを加えるように設計されています。この試験は、ランダム酸化物欠陥とイオンによる酸化物汚染に起因するドリフトを検出するように設計されています。

© Semiconductor Components Industries, LLC, 2016

IGBTの場合、コレクタをエミッタに短絡した状態でゲート−エミッタ間に電圧を印加します。I_{GES}、$V_{GE(th)}$、および$V_{CE(on)}$が、監視対象のDCパラメータです。何らかの酸化物欠陥が存在すると早期デバイス故障につながります。

代表的条件：
V_{GE} = ±20 Vまたは定格V_{GE}の100%
V_{CE} = 0 (短絡)
T_J = 150°Cまたは最大T_J
持続時間： 認定のために1,000時間

高温保管寿命(HTSL)試験

HTSL試験は、デバイスの安定性、高温への耐久力、パッケージ内部の製造完全性を示すように設計されています。デバイスは実際のフィールドでそのような過度の高温に晒されることはありませんが、この試験の目的は保管温度での長期間に発生する可能性のあるあらゆる故障メカニズムを加速することです。

この試験は、網目バスケットにデバイスを入れて、周囲温度が制御された高温室に置いて実施します。結果は時間の関数で表されます。

代表的条件：
プラスチック・パッケージの場合はT_A = 150°C
持続時間： 認定のために1,000時間

高湿高温逆バイアス(H^3TRB)

H^3TRB試験は、高温/高湿環境における長期間動作の複合的な劣化効果に対する、コンポーネント部品および構成素材の抵抗を判定するように設計されています。この試験は非密閉デバイスにのみ適用されます。

湿度は以前から半導体、特にプラスチック・パッケージに封入されたデバイスにとって重大な劣化要因でした。湿度に起因する劣化の大半は、直接的または間接的に、不活性化材料を通過した水蒸気侵入や表面の腐食によって発生します。オンセミでは、前者の問題に効果的に対処し、接合部の「不活性化」プロセス、ダイ・コーティング、パッケージ材料の適切な選択によってそれを制御しています。

代表的条件：
V_{CE} = 最大定格の80〜100%
V_{GE} = 0 (短絡)
T_A = 85°C
RH = 85%
持続時間： 認定のために1,000時間

代表的条件：
$V_{GE} \geq 10$ V
ΔT_J = 100°C
$R_{\theta JC}$ = デバイスによって異なる
T_{on}、$T_{off} \geq 30$秒
持続時間：認定のために10,000〜15,000サイクル

バイアス印加なし高加速ストレス試験(UHAST)

UHASTは高い蒸気圧力レベルをデバイスに適用し、デバイスの水蒸気耐性を判定する目的で設計されています。この試験は、プラスチック/エポキシに封入されたデバイスのみに対して実施され、密閉パッケージ(メタル・キャン・デバイスなど)では実施されません。チェンバ内で、デバイスを収容したトレイを、脱イオン水の表面より約2インチ(5.08 cm)上に配置し、水蒸気が凝集して水にならないようにします。正しい温度と大気圧に達した後、24時間以上これらの試験条件を維持します。その後、デバイスを取り出して空気乾燥させます。通常、監視対象となるパラメータはリーク電流と電圧です。

代表的条件：
T_A = 131°C
P = 14.7 psi
RH = 100%
持続時間： 認定のために72時間

断続的動作寿命(IOL)

IOL試験の目的は、「実際の」環境で一般的に発生するとおり、サイクリング・オン(消費電力によりデバイスが加熱)とサイクリング・オフ(印加電力の取り外しによりデバイスが熱的に冷却)を実施して、チップやパッケージ・アセンブリの完全性を判定することです。

望ましい機能温度に達するまで、デバイスにDC電力を印加します。次に、電源をオフにして、接合部温度が周囲温度に等しくなるまで、強制空冷を行います。

$$\Delta T = \Delta T_C + R_{\theta JC} P_D \quad \text{(eq. 1)}$$

$$\Delta T_J = 100^\circ C \quad \text{(eq. 2)}$$

(通常、これは加速条件です)

$$\Delta T_C = T_{C\,HIGH} - T_{C\,LOW} \quad \text{(eq. 3)}$$

規定サイクル数にわたってこのシーケンスを繰り返します。結果の再現性を保証するために、温度変化を注意深く維持します。

断続的動作寿命試験は、チップと実装面の間およびチップとワイヤ・ボンド・インタフェースの間にあるダイ・ボンド・インタフェースの熱的疲労の度合いを示します。

IGBTの場合、性能監視に使用するパラメータは、熱抵抗、スレッショルド電圧、オン抵抗、ゲート−エミッタ間リーク電流、およびコレクタ−エミッタ間リーク電流です。

熱的障害は、熱的疲労が原因で熱抵抗またはオン抵抗が増大してメーカのデータシートで規定される最大値を上回ると発生します。

温度サイクル(TC)

温度サイクル試験の目的は、空気媒体での高温と低温間の移動に対するデバイス抵抗、およびそれらの温度でのサイクリング効果を判定することです。

この試験はデバイスをそれぞれ高温と低温に設定したチェンバ内に交互に置く方法で実施します。各チェンバ内の気温は空気循環により均等に維持されています。これらのチェンバ内には十分な熱容量があるので、デバイスはチェンバ内に移された後、規定周囲温度に達します。

各サイクルでは、一方の極値温度に15分以上晒してからすぐに、他方の極値温度に15分以上晒します。これで1サイクルが完了します。この試験は温度極値間での即時移動で、非即座移動の場合よりもデバイスにより大きいストレスを与えることに注意してください。

代表的な極値

−65/ + 150°C

サイクル数は予期される環境の苛酷さに合わせることができます。デバイスの品質を判定するには10サイクルで十分であることが業界で一般的に受け入れられています。温度サイクルは、デバイス内の複数の材料間で膨張係数の違いに起因して加えられる過剰な歪みを識別します。

低温保管寿命(LTSL)試験

LTSL試験は、デバイスの安定性、低温下での耐久力、パッケージ内部の製造完全性を示すように設計されています。デバイスは実際のフィールドでそのような過度の低温に晒されることはありませんが、このテストの目的は保管温度で長期間にわたって発生する可能性のあるあらゆる故障メカニズムを加速することにあります。

代表的条件：

プラスチック・パッケージの場合はT_A = −65°C

持続時間： 認定のために1,000時間

この試験は、網目バスケットにデバイスを入れて、周囲温度が制御された高温室に置いて実施します。結果は時間の関数で表されます。

安定状態動作寿命(SSOL)試験

SSOL試験は、安定状態で継続的に動作する場合の動作寿命に関して、チップやパッケージ・アセンブリの完全性を示すように設計されています。

IGBTの場合、性能監視に使用するパラメータは、熱抵抗、スレッショルド電圧、オン抵抗、ゲート−エミッタ間リーク電流、およびコレクタ−エミッタ間リーク電流です。

代表的条件：

$V_{GE} \geq 10V$

$\Delta T_J = 100°C$

T_A = 25°C 持続時間： 認定のために1,000時間

熱的故障は、熱的疲労が原因で熱抵抗またはオン抵抗が増大してメーカのデータシートで規定される最大値を上回ると発生します。

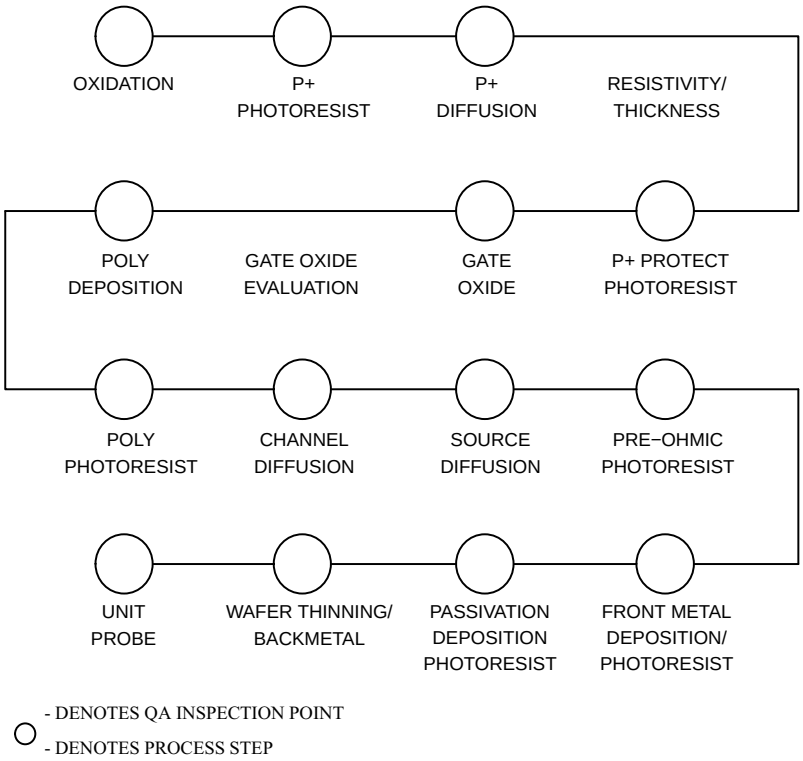
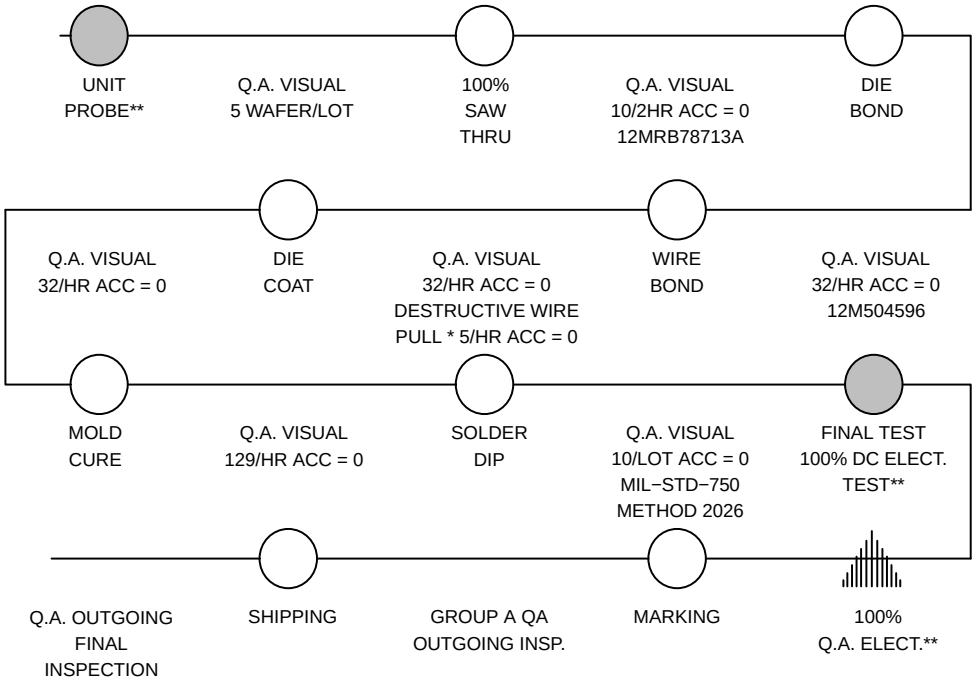


Figure 1. IGBT Wafer Fabrication



*100% NON−DESTRUCTIVE WIRE PULL AFTER WIRE BOND
**100% DC ELECTRICAL TESTING

− DENOTES QA INSPECTION POINT
○ − DENOTES PROCESS STEP

Figure 2. Assembly Process Flow

パッケージ関連の環境試験プログラム：

A 物理的寸法 − この試験はデバイスの外形図仕様に対する準拠を判定する目的で実施します。
B 目視および機械的検査 − マーキングの視認性や汚れなど、特定の審美的および機能的基準に基づき製品の受容性を判定する試験です。
C 溶液に対する抵抗 − デバイス端子の半田付け能力を判定する試験です。
D 端子強度 − この試験は端子強度を確認するために端子の折曲げ試験です。

製造プロセスごとに品質と信頼性に関する分布が示されます。この分布は、高い平均値、狭い範囲、一貫性のある形状を保証できるように制御する必要があります。適切な設計とプロセス制御を通じてこの目標を達成でき、それによって、分布下側の尾の除外を試みる審査プログラムの負荷を軽減できます。

加速ストレス試験

このレポートに掲載した一部の試験の性質は、通常の動作条件でデバイスに課されるストレスを大幅に上回っています。したがって、試験条件は該当故障メカニズムを「加速」するものであり、オンセミは他の方法を使用する場合に比べて、より短期間に将来の故障率を予測できます。温度に依存する故障モードは、アレニウス・モデルを使用して特性化することができます。

$$AF = \frac{EA}{K}\left(\frac{1}{T2} - \frac{1}{T1}\right) \qquad \text{(eq. 4)}$$

AF = 加速係数
EA = 活性化エネルギー (eV)
K = ボルツマン定数($8.62 \times 10E^{-5}$ eV/K)
T2 = 動作温度、K
T1 = 試験温度、K

したがって、等価デバイス時間は加速係数(アレニウス・モデルで決定)に、実際のデバイス時間を乗算した値に等しくなります。

データの確認

高温逆バイアス(HTRB)は、リーク電流の安定性を示しますが、これはIGBRのフィールドの歪に関連しています。HTRBは高温逆バイアス試験により故障メカニズムを強化し、そのためにデバイスの品質と信頼性に関する適切な指標として機能すると同時に、プロセス制御が有効な影響を及ぼす検証にも寄与します。

高温ゲート・バイアス(HTGB)は、加速された高温での順方向「ゲート・バイアス」印加条件におけるデバイスの安定性を時間の関数として確認します。この試験は、ゲート酸化物に電気的ストレスを加え、ランダム酸化物欠陥に起因するドリフトを検出する目的で実施します。この故障メカニズムは、信頼性「バスタブ曲線」の初期不良ゾーンとランダム故障ゾーンで表現され、欠陥は非常に低いレートにとどまります。

断続的動作寿命(IOL)は、サイクリング・オン(消費電力によりデバイスが加熱)とサイクリング・

オフ(印加電力の取り外しによりデバイスが熱的に冷却)を実施して、チップやパッケージ・アセンブリの完全性を判定するための優れた加速ストレス試験です。この試験は「実用的な」環境で通常発生する動作をシミュレートする、あらゆるテストの中で最も重要なものです。IOLはダイ・ボンドとワイヤ・ボンドに関する試験であり、デバイスへの電力供給後に電力供給を停止します。デバイス性能に関連し、全材料の熱膨張に互換性があることを検証します。オンセミは、「デバイス・システム**」全体に関連する継続的プロセス管理活動として、包括的なIOL試験を実施しています。また、オンセミはデルタ関数温度に関する包括的な分析と比較も実施しています。オンセミは、デバイスに効果的にストレスを加えるために、必要に応じてデルタT_Jとして100°Cを使用することを決定しました。この値は多くの顧客のアプリケーションをはるかに上回っており、デバイスの信頼性モデリングを決定します。

温度サイクル(TC)も、空気媒体での高温と低温間の移動に対するデバイス抵抗を判定するための優れたストレス試験です。IOLが「デバイス・システム」に内部から電気的ストレスを加えるのに対し、温度サイクルは「デバイス・システム」に外部環境条件から熱的ストレスを加えます。

高温保管寿命(HTSL)、高湿高温逆バイアス(H^3TRB)、熱的ショック(TC)、および「圧力釜」(オートクレーブ)は定期的な試験ですが、オンセミの信頼性エンジニアはHTRB、HTGB、IOL、TCのいずれも最重要事項と考えています。オンセミは長年にわたって半導体業界で活動しており、継続的な信頼性、品質、顧客関係においてリーダの地位を堅持していきます。

信頼性監査プログラム

オンセミでは、信頼性監査プログラムを厳格に実施することで信頼性を保証しています。すべてのIGBT製品は、プロセス・テクノロジとパッケージ・タイプに応じて、汎用ファミリに分類されています。これらのファミリは、最終試験時に四半期ごとに在庫からサンプリングされ、監査試験に供出されます。各製品に対して極端なストレス試験をリアルタイムで実施する方法で、プロセス内制御によって検出できるプロセスの異常性を明らかにできることがあります。代表的な信頼性監査試験として、高温逆バイアス、高温ゲート・バイアス、断続的動作寿命、温度サイクリング、オートクレーブを挙げることができます。隠れた故障モードを明らかにするために、信頼性試験は通常の品質検査や信頼性検査の試験条件を上回るように設計されています。

検出された監査故障は、リアルタイム評価のために製品分析ラボに転送されます。この高度に専門化された領域には、多様な分析機能が用意されており、その中には電気的特性評価、湿式化学とプラズマ技法、冶金学に基づく区分、走査型電子顕微鏡、分散型X線、オージェ分光器、顕微鏡撮影やマクロ撮影が含まれます。総合して、これらの機能により、故障メカニズムの分析を短時間で正確に実施でき、評価の結果を是正措置に変換して、適切な責任部署に伝達できることが保証されます。

オンセミの信頼性監査プログラムは、IGBT製品ラインに潜んでいる可能性があるプロセスの異常性に関するわずかな手掛かりも明らかにします。このように、顧客満足度を積極的に保証する信頼性監査を通じて、懸念を厳格かつ継続的に見つけ出す作業が今後も実施されます。

IGBT RELIABILITY AUDIT PROGRAM

Test	Conditions	S/S	Frequency
HTRB	V_{CE} = 80 −100% Max rating V_{GE} = 0 V T_J = 150°C Duration = 168 hours (short), 1,000 hours (long)	77pcs	Qty
HTGB	V_{GES} = ± 20 V V_{CE} = 0 V T_J = 150°C Duration = 168 hours (short), 1,000 hours (long)	77pcs	Qty
IOL	D T_J = 100°C V_{CE} ≥ 10 V Duration = 5000 cycles (short), 15,000 cycles (long)	77pcs	Qty
Solder Heat	1 cycle @ 260°C for 10 seconds followed by:	77pcs	Qty
Temperature Cycle	100 cycles (short) 500 cycles (long) −65 to +150°C Dwell time ≥ 15 minutes	77pcs	Qty
Pressure Cooker	P = 15 psi, T = 121°C Duration = 48 hours (short), 96 hours (long) (plastic package only)	77pcs	Qty
HTSL	T_A = 150°C, 168 hrs	77pc	Qty

信頼性の本質

半導体ユーザの意識で最も強いものは、デバイス性能の経時変化に関する疑問です。特定のデバイスの適用性を確立した後、当該デバイスがトラブルなくサービスを提供できる期間に応じて、デバイスの有効性が決まります。デバイスの信頼性とはまさに、お客様にどれほど良好にサービスを提供できるかを表現したものです。信頼性は、特定のメーカ仕様の下で、特定期間にわたって故障なく性能を発揮できる可能性として再定義できます。長期間に対する半導体の故障率をプロットすると、一般的に「バスタブ曲線」と呼ばれる形が描かれます。

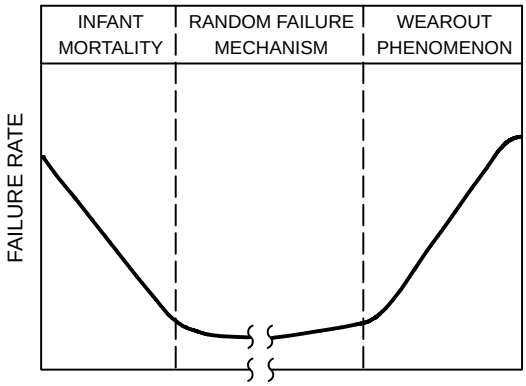


Figure 3. Failure Rate of Semiconductor

信頼性の構造

信頼性評価には通常、デバイスの母集団全体の標本のみ抽出した後、中心極限定理という概念を適用し、次式を通じλ^2分布を使用して故障発生率を計算します。

$$\lambda 3 \frac{\lambda 2(\alpha, 2r + 2)}{2nt} \qquad \text{(eq. 5)}$$

ここで、

$$\alpha = \frac{100 - cl}{100} \qquad \text{(eq. 6)}$$

信頼限界とは計算で望まれる保守性の度合いのことです。中心極限定理では、大規模な母集団から取り出した任意の標本の値は正規分布を形成するとしています。最良の推定を行うために50%信頼制限という用語が定義されており、これはこの分布の平均値に相当します。90%信頼限界は非常に保守的な値で、λが大きくなる結果をもたらし、分布領域の90%がそれよりも左にくる点を表します。

(2r + 2)という項を自由度と呼び、λ^2の表に従う形状で棄却が行われる回数を表現しています。棄却の定義はメーカごとに異なる場合が多いため、棄却回数は重要な要素です。標本サイズが小さくなるほど、また試験時間が短くなるほど、試験が母集団全体を表していない可能性が大きくなり、実際の長期的な故障率が非常に低い状況であっても、試験の持続時間が短い場合は、λ^2の計算の結果として、驚くほど大きいλの値が得られます。この理由で、実際の長期的な故障率を示すために、比較的多量のデータを収集する必要があります。このため数千個のデバイスを数年かけて試験する必要が生じますが、対策として、加速試験という手法が開発されました。

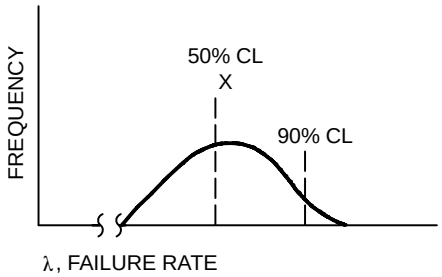


Figure 4. Confidence Limits and the Distribution of Sample Failure Rates

数年にわたる半導体デバイス試験を通じて、温度が故障を加速すること、またこの挙動はアレニウス式の形態に調和することが知られています。

$$R(t) = Ro(t)e^{-/KT} \qquad \text{(eq. 7)}$$

ここで、

R(t) = 時間および温度の関数として表現した応答率
R_o = 定数
t = 時間
T = 絶対温度、°ケルビン(°C + 273°)
　= 電子ボルト(ev)単位の活性化エネルギー
K = ボルツマン定数 $= 8.62 \times 10^{-5}$ ev/°K

この式を次のように変形することもできます。

AF = 加速係数
T2 = ユーザ温度
T1 = 実際の試験温度

アレニウス式は、温度に応じて応答率が指数関数的に上昇することを記述しています。この結果、片対数の方眼紙にプロットすると直線が描かれ、傾きは特定の応答または故障メカニズムのエネルギー・スレッショルドであると物理的に解釈されます。

信頼性の認定/評価の概要

オンセミの信頼性/品質保証エンジニアリング部門の機能として、製品導入、プロセス変更(マイナーとメジャーのどちらも)、完全性と準拠に関する信頼性を検証するための製品ラインの更新について新製品を評価することです。信頼性を評価するために、認定要件の性質に応じて、「信頼性試験」セクションで概要を示した一連の包括的信頼性試験、または特別な試験を実施することになります。

onsemi, onsemi, and other names, marks, and brands are registered and/or common law trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC dba "**onsemi**" or its affiliates and/or subsidiaries in the United States and/or other countries. **onsemi** owns the rights to a number of patents, trademarks, copyrights, trade secrets, and other intellectual property. A listing of **onsemi**'s product/patent coverage may be accessed at www.onsemi.com/site/pdf/Patent−Marking.pdf. **onsemi** reserves the right to make changes at any time to any products or information herein, without notice. The information herein is provided "as−is" and **onsemi** makes no warranty, representation or guarantee regarding the accuracy of the information, product features, availability, functionality, or suitability of its products for any particular purpose, nor does **onsemi** assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. Buyer is responsible for its products and applications using **onsemi** products, including compliance with all laws, regulations and safety requirements or standards, regardless of any support or applications information provided by **onsemi**. "Typical" parameters which may be provided in **onsemi** data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. **onsemi** does not convey any license under any of its intellectual property rights nor the rights of others. **onsemi** products are not designed, intended, or authorized for use as a critical component in life support systems or any FDA Class 3 medical devices or medical devices with a same or similar classification in a foreign jurisdiction or any devices intended for implantation in the human body. Should Buyer purchase or use **onsemi** products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold **onsemi** and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that **onsemi** was negligent regarding the design or manufacture of the part. **onsemi** is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer. This literature is subject to all applicable copyright laws and is not for resale in any manner.

ADDITIONAL INFORMATION

TECHNICAL PUBLICATIONS:
Technical Library: www.onsemi.com/design/resources/technical−documentation
onsemi Website: www.onsemi.com

ONLINE SUPPORT: www.onsemi.com/support
For additional information, please contact your local Sales Representative at www.onsemi.com/support/sales

◊