

エレクトロマイグレーション故障の加速試験に基づく 市場故障率予測の方法

岡村好庸*・宮本秀範**

A method of predicting the field failure rate caused by electromigration with stressed test data

Yoshinobu Okamura* and Hidenori Miyamoto**

Abstract

Electromigration as a wear-out failure mode for semiconductor devices plays an important part in predicting circuit reliability. In this report, a method of predicting the field failure rate caused by electromigration with current and temperature stressed test data is reported and a calculation program for it is presented. The failure by electromigration is assumed to be lognormally distributed according to recent experiments and the generalized Black's equation for median time to failure is used in the program.

1. まえがき

エレクトロマイグレーションとは、金属が高電流密度でストレスされている場合、電流により金属中に生じる金属原子の移動である。このエレクトロマイグレーションは、半導体デバイスの摩耗故障の一因であると考えられている⁽¹⁾。半導体集積回路の配線薄膜は単結晶粒の集合である多結晶構造をもつ。したがって、金属原子の移動として格子拡散、粒界拡散、表面拡散が考えられる。多結晶薄膜には粒界が多く粒界における欠陥の数も多く、また粒界にある金属原子の活性化エネルギーも小さいため、粒界拡散に基づくエレクトロマイグレーションが、大きな比重を占める。さらに、体積に比べ表面積が大きく表面拡散も無視できない⁽²⁾⁽³⁾。エレクトロマイグレーションに基づく故障として、断線と短絡がある。金属原子の移動した跡にはボイドが生じ、配線膜の断面積が減少

し、電流密度がさらに大きくなりボイドの成長が加速されやがて断線する。また原子の移動した先にはヒロックが生じ近接配線間や多層配線の層間における短絡の原因となる。エレクトロマイグレーションに起因する故障はICやLSIの配線が微細化されるにつれて増え、信頼性における重要な問題となってきている。特に、企業においては一定の信頼性を保証するために、加速試験を行い、市場における故障率予測をすることが今後ますます重要となってくるであろう。そこで本報告では、まず、加速試験結果をもとにした市場故障率予測の方法を考察する。次に、それに基づいて市場故障率予測のプログラムを開発する。そして、最後にまとめをする。

2. 市場故障率予測の方法

エレクトロマイグレーション劣化による摩耗故障が対数正規分布に従うかワイブル分布に従うかは、理論的にも実験的にも論争的であった。実験的にはサンプルの数が少ないことが正しい分布を見つけることを困難にしていた。Towner⁽⁴⁾はAl-1%Si, TiN/Al-1%Si, Al-0.5%

* 宇部工業高等専門学校電気工学科

** ソニー大分株

Cuのそれぞれの配線のエレクトロマイグレーション故障につき、最大113個のサンプルを用いて、累積故障率が1%~99%までのデータを得た。その結果、配線の粒径が線幅より小さい場合には故障分布は対数正規分布に従うことを見つけた。本報告では、Townerの実験結果に基づき、エレクトロマイグレーション故障は対数正規分布に従うことを前提にして考察をする。すなわち、故障確率密度は

$$f(t) = (1/\sigma t \sqrt{2\pi}) \exp \{-(\ln t - \ln t_{50})^2 / 2\sigma^2\} \quad (1)$$

と表される。ここで、 σ^2 は正規分布における分散、 t_{50} は累積故障率が50%となる時間である。累積故障率は故障確率密度の積分として計算されるので

$$F(t) = \int_0^t f(s) ds = \int_{-\infty}^a N(0,1) ds \quad (2)$$

ここで、 $N(0,1)$ は正規分布を表す。すなわち

$$N(0,1) = (1/\sqrt{2\pi}) \exp(-s^2/2) \quad (3)$$

また、 a は正規分布の積分の上限を示し、

$$a = (1/\sigma) \ln(t/t_{50}) \quad (4)$$

と書かれる。累積故障率が16%となる時、 a はほぼ-1となるので、 σ につき、次の近似値を得る。

$$\sigma \doteq \ln(t_{50}/t_{16}) \quad (5)$$

すなわち、 σ は累積故障率が16%および50%となる時間を知ることにより求められる。またこの関係は、加速係数が一定のとき、 σ が試験環境に依存しないことを示す。故障率 $\lambda(t)$ は、故障確率密度を信頼度関数 $R(t)$ で割ることにより求められ

$$\lambda(t) = f(t)/R(t) \quad (6)$$

となる。ここで、信頼度関数も累積故障率と同様正規分布の積分で表される。

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_a^{\infty} N(0,1) ds \quad (7)$$

対数正規分布に基づく故障率の計算においては、通常信頼度関数は1と近似されるが、 a の値が正の場合には信頼度関数を正確に評価しなければならない。このように、故障率を求めるためには、 t_{50} および t_{16} の値を実験により得なければならない。

市場条件で、 t_{50} および t_{16} の値を得ることは、かなり長時間の実験を必要とする。そこで、データをより効率的に得るため高温、高電流密度の環境における加速試験がなされている。加速試験により得られたデータを、市場環境での値に変換するために加速係数を求める必要がある。Black⁽⁶⁾は平均寿命(平均故障時間)が

$$MTF = A j^{-2} \exp(q/kT) \quad (8)$$

と表されることを示した。ここで、 A は配線に固有の定数、 j は電流密度、 q は活性化エネルギー、 k はボルツマン定数、

T は絶対温度である。 q は0.5~0.8(eV)、また電流の指数2は今日では2~3と言われている⁽⁶⁾。(8)式から試験環境と市場環境との間の加速係数 α を求めると

$$\alpha = (j_s/j_f)^2 \exp \{(q/k)(1/T_f - 1/T_s)\} \quad (9)$$

ここで、 $j_s(j_f)$ は試験環境(市場環境)における電流密度、 $T_s(T_f)$ は試験環境(市場環境)における絶対温度を表す。したがって、加速試験により得られたデータ t_{50} は市場においては αt_{50} となる。そこで、(1)式の t_{50} を αt_{50} に置き換えることにより市場故障率を表す一般式が得られる。

3. 市場故障率予測プログラム

故障分布が対数正規分布に従う場合において、温度および電流加速試験により得られたデータをもとに、市場故障率を予測するプログラムを作成する。コンピュータ処理言語として、VAX FORTRANを用いる。

入力データ

* 試験条件における実動作温度 [°C] (T_s-273)	ts
市場における実動作温度 [°C] (T_f-273)	tf
* 試験条件における実動作電流 [A/cm ²] (j_s)	js
市場における実動作電流 [A/cm ²] (j_f)	jf
活性化エネルギー [eV]	(q) q
電流の指数	n
* 累積故障率が50%となる時間 [h]	(t_{50}) ts50
* シグマ σ	(σ) siguma
故障率を算出すべき時間	(t) t

*は試験設定条件および試験結果

出力

温度加速係数	y11
温度と電流による加速係数(α)	y21
市場での中位寿命 [h] (αt_{50})	y2
t時間後の市場での確率密度関数値 [fit] (f(t))	ffit
信頼度関数(7)の積分下限値 (a)	y4

ここで、()内は考察で用いられた記号であり、右端はプログラムで使われる変数を表す。以下にソースプログラムを示す。

C

program emlife

```

C
y33=DLOG(y3)
C 試験条件と試験結果データの変数
y4=y33/sigma
real*8 js,ts,ts50,sigma
y5=-y4**2/2
C 市場条件の変数
y6=DEXP(y5)
real*8 jf,tf,t
ffit=1e9*y6/t/sigma/2.507
C Blackの式におけるパラメータ変数
C 出力
real*8 n,q
write(6,102) y11,y21
C その他の中間変数
102 format(1x,/3x,'温度加速係数=',f12.3,/3x,
real*8 tsa,tfa,y1,y11,y2,y3,y33,y4,y5
$ '温度と電流による加速係数=',f12.3)
C
write(6,101) y2,t,ffit
write(*,*) '試験データよりEMの市場故障率'
101 format(1x,/3x,'市場でのMTF=',f12.3,10x,'f(
write(*,*) 'を計算するプログラム'
$ f8.1,')=',p1e12.4,' [fit] ')
C
write(6,100) y4
C 必要な項目の入力
100 format(1x,/3x,'ln(t/tf50)/sigma=',f6.3)
C 試験に関する項目
stop
write(*,*) '試験における電流密度[A/cm2]:'
end
read(*,*) js
4. むすび
write(*,*) '試験における温度 [C]:'
I C, L S I の配線に生じるエレクトロマイグレーション故障につき、加速試験によって得られたデータから将来の市場故障率を予測する方法について考察を行い関連のプログラムを開発した。
read(*,*) ts
エレクトロマイグレーション故障は、対数正規分布に従うものとして、累積故障率、信頼度関数、故障率を求めた。試験環境と市場環境の差異を定量的に評価するためBlackのモデル式を用いた。Blackは電流の指数を2としたが、プログラム上では、より汎用性をもたせるために、任意の値をインプットできるようになっている。また、出力は故障率そのものではなく、故障確率密度と信頼度関数を求める積分の下限値とした。通常、故障率は故障確率密度とほぼ同じと近似されているが、積分の下限値aが正より大きくなる場合には、信頼度関数が0.5より小さくなるため、aの値を用いて正規分布表から信頼度関数を評価して故障率を求めることが必要となる。
tsa=ts+273
write(*,*) '試験から得られたMTF(t50) [h]:'
市場故障率を予測するためには、故障分布を正確に知らなければならない。本報告では、対数正規分布を想定したが、粒径が配線幅より大きい場合にはワイブル分布が使われることもある。また試料作成方法やその形状、サンプル数などにより分布が異なることもあり、ここでの考察の方法の適用に際しても実験データを注意深く観察して、その故障分布を決めなければならない。
read(*,*) ts50
write(*,*) '試験から得られたシグマ:'
read(*,*) sigma
C 市場に関する項目
write(*,*) '市場での使用電流密度[A/cm2]:'
read(*,*) jf
write(*,*) '市場での使用温度 [C]:'
read(*,*) tf
tfa=tf+273
write(*,*) '何時間後の故障率を求めるのか:'
read(*,*) t
C Blackのモデル式に関する項目
write(*,*) '活性化エネルギー [eV]:'
read(*,*) q
write(*,*) '電流の指数:'
read(*,*) n
C 故障率の計算
y1=q*1e5*(1/tfa-1/tsa)/8.6159
y11=DEXP(y1)
y21=(js/jf)**n*y11
y2=ts50*y21
y3=t/y2

```

参考文献

- 1) J. R. Black, "Electromigration-A brief survey and some recent results", IEEE, ED-4, pp.338-347 (1969).
- 2) F. M. d'Heurle and P. S. Ho, "Electromigration in thin films", Thin Films-Interdiffusion and Reactions, J. M. Poate, K. N. Tu and J. W. Mayer, Eds., pp.243-303, John Wiley & Sons (1978).
- 3) 和田哲明, 「エレクトロマイグレーション対策」, 月刊 Semiconductor World, 7月号, pp.108-115 (1985).
- 4) J. M. Towner, "Are electromigration failures lognormally distributed?", 28th Ann. Proc. IRPS, pp100-105 (1990).
- 5) J. R. Black, "Mass transport of aluminum by momentum exchange with conducting electrons", 6th Ann. Proc. IRPS, pp148-159 (1966).
- 6) 安食恒雄監修, 「半導体デバイスの信頼性技術」, p.195, 日科技連, (1988)

(平成7年9月25日受理)