

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2014-52832

(P2014-52832A)

(43) 公開日 平成26年3月20日(2014.3.20)

(51) Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
G06F 17/50 (2006.01)	G06F 17/50 666Y	5B046
H01L 21/82 (2006.01)	G06F 17/50 658J	5F064
	H01L 21/82 T	

審査請求 未請求 請求項の数 3 O L (全 24 頁)

(21) 出願番号 特願2012-196681 (P2012-196681)
(22) 出願日 平成24年9月6日(2012.9.6)

特許法第30条第2項適用申請有り 日本機械学会東北
学生会第42回卒業研究発表講演会、社団法人日本機械
学会主催、平成24年3月6日開催

(71) 出願人 504229284
国立大学法人弘前大学
青森県弘前市文京町1番地
(74) 代理人 100108372
弁理士 谷田 拓男
(72) 発明者 笹川 和彦
青森県弘前市文京町1番地 国立大学法人
弘前大学内
Fターム(参考) 5B046 AA08 JA01 JA07
5F064 EE22 EE27 HH02 HH06 HH09
HH11

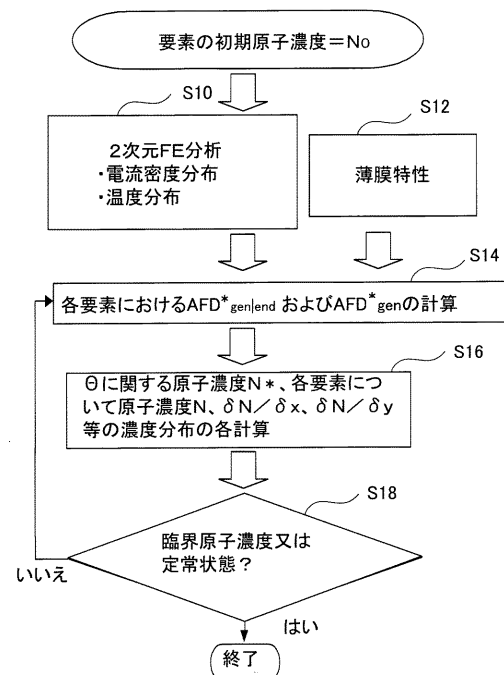
(54) 【発明の名称】ビア接続の多層配線の信頼性を評価する信頼性評価シミュレーションプログラム、ビア接続の多層配線の許容電流密度向上方法およびビア接続の多層配線

(57) 【要約】

【課題】リザーバ構造を有するビア接続の多層配線について、EM損傷過程の数値シミュレーションを実施しリザーバ効果を考慮しつつ閾電流密度を評価することにより配線の信頼性を評価するシミュレーション方法等を提供する。

【解決手段】電流密度分布および温度分布を2次元FE分析により計算する。上記解析結果と薄膜特性とから各要素における支配パラメータ (AFD_{gen}^{*end} 、 AFD_{gen}^{*}) を計算する。 θ に関する原子濃度 N^{*} を支配パラメータの値に基づき計算する。各要素における原子濃度 N はすべての θ の値についての N^{*} の平均により計算する。定常状態に達するまで繰返し計算のための設定を行った後、支配パラメータの計算を繰返す。リザーバ構造を有するビア接続の多層配線構造において、陰極端のビア側のみリザーバを設け、当該多層配線内部の最小原子濃度を増加させることにより、多層配線の許容電流密度を増加させることができる。

【選択図】図2



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

リザーバ構造を有するビア接続の多層配線について、エレクトロマイグレーション損傷過程におけるビア接続の多層配線の信頼性を評価する信頼性評価シミュレーションプログラムであって、コンピュータに、

前記多層配線を二次元的に要素分割する要素分割ステップ、

前記要素分割ステップで分割された各要素の初期原子濃度を N_0 とする初期設定ステップ、

2次元有限要素法により前記多層配線内の電流密度分布及び温度分布を計算する2次元有限要素法ステップ、

前記2次元有限要素法ステップにより計算された前記多層配線内の電流密度分布及び温度分布と記録部に記録された該多層配線材料の物性定数とに基づき、単位時間に単位体積当たりエレクトロマイグレーションにより何個原子が消失するかを示す以下の支配パラメータ（陰極および陽極端の要素とビアとでは $AFD_{gen|end}^*$ 、他の要素では AFD_{gen}^* ）、

【数 1】

$$AFD_{gen}^* = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \left(AFD_{gb\theta}^* + \left| AFD_{gb\theta}^* \right| \right) d\theta \quad (3)$$

【数 2】

$$\begin{aligned}
AFD_{gb\theta}^* = & C_{gb}^* N \frac{4}{\sqrt{3}d^2} \frac{1}{T} \exp \left\{ -\frac{Q_{gb} + \kappa\Omega(N - N_T)/N_0 - \sigma_T\Omega}{kT} \right\} \times \\
& \left\langle \sqrt{3}\Delta\phi \left\{ (j_x \cos\theta + j_y \sin\theta) Z^* e\rho - \frac{\kappa\Omega}{N_0} \left(\frac{\partial N}{\partial x} \cos\theta + \frac{\partial N}{\partial y} \sin\theta \right) \right\} \right. \\
& - \frac{d}{2} \Delta\phi \left\{ \left(\frac{\partial j_x}{\partial x} - \frac{\partial j_y}{\partial y} \right) Z^* e\rho \cos 2\theta - \frac{\kappa\Omega}{N_0} \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \cos\theta + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \sin\theta \right) \cos 2\theta \right. \\
& \quad \left. + \left(\frac{\partial j_x}{\partial y} + \frac{\partial j_y}{\partial x} \right) Z^* e\rho \sin 2\theta - 2 \frac{\kappa\Omega}{N_0} \frac{\partial^2 N}{\partial x \partial y} \sin 2\theta \right\} \\
& - \frac{\sqrt{3}}{4} d \frac{\kappa\Omega}{N_0} \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) - \frac{\kappa\Omega/N_0}{kT} \\
& \times \left[\frac{\sqrt{3}}{4} d \left\{ Z^* e\rho \left(j_x \frac{\partial N}{\partial x} + j_y \frac{\partial N}{\partial y} \right) - \frac{\kappa\Omega}{N_0} \left(\frac{\partial N}{\partial x} \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} \frac{\partial N}{\partial y} \right) \right\} \right. \\
& \quad \left. - \frac{d}{2} \Delta\phi \left\{ Z^* e\rho \left(j_x \frac{\partial N}{\partial y} + j_y \frac{\partial N}{\partial x} \right) - 2 \frac{\kappa\Omega}{N_0} \frac{\partial N}{\partial x} \frac{\partial N}{\partial y} \right\} \sin 2\theta \right] \\
& + \frac{\sqrt{3}d}{4T} \left\{ \frac{Q_{gb} + \kappa\Omega(N - N_T)/N_0 - \sigma_T\Omega}{kT} - 1 \right\} \\
& \times \left\{ Z^* e\rho \left(j_x \frac{\partial N}{\partial y} + j_y \frac{\partial N}{\partial x} \right) - \frac{\kappa\Omega}{N_0} \left(\frac{\partial N}{\partial x} \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} \frac{\partial N}{\partial y} \right) \right\} \Bigg\rangle, \quad (2)
\end{aligned}$$

ここで、 N ：原子濃度、 D_0 ：振動数項、 k ：ボルツマン定数、 T ：絶対温度、 Q_{gb} ：原子拡散の活性化エネルギー、 κ ：保護膜拘束下の濃度変化と応力変化との間の係数、 Ω ：原子体積、 σ_T ：引張の熱応力、 N_T ： σ_T が作用したときの原子濃度、 N_0 ：無応力状態における原子濃度、 Z^* ：有効電荷数、 e ：単位電荷、 ρ ：電気抵抗率、 j^* ：電流密度ベクトルの J 方向の成分、 $\partial N / \partial l$ ：原子濃度勾配の J 方向成分、 δ ：結晶粒界の有効幅、 θ ：微小単位構造と x 軸との間の角度、 d ：平均結晶粒径、 $\Delta\phi$ ：結晶粒界間の角度に関する定数、 Q_{gb} ：粒界拡散の活性化エネルギー、 $D_x = Z^* e\rho j_x - \kappa\Omega/N_0 (\partial N / \partial x)$ 、 $D_y = Z^* e\rho j_y - \kappa\Omega/N_0 (\partial N / \partial y)$ であり、

【数 3】

$$\begin{aligned}
 AFD_{\text{gen}}^* \Big|_{\text{end}} &= \frac{2}{\sqrt{3}\pi d^2} \frac{C_{gb}^* N}{T} \exp\left(-\frac{Q_{gb} + \kappa\Omega(N - N_T)/N_0 - \sigma_T\Omega}{kT}\right) \\
 &\left[\begin{aligned}
 &6D_x \sin\beta - 6D_y \cos\beta \\
 &+ \frac{\sqrt{3}}{4}\pi d \left\{ -\frac{\kappa\Omega}{N_0} \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) - \frac{\kappa\Omega/N_0}{kT} \left(D_x \frac{\partial N}{\partial x} + D_y \frac{\partial N}{\partial y} \right) \right. \\
 &\left. + \frac{1}{T} \left(\frac{Q_{gb} + \kappa\Omega(N - N_T)/N_0 - \sigma_T\Omega}{kT} - 1 \right) \left(D_x \frac{\partial T}{\partial x} + D_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right\} \right] \quad (4)
 \end{aligned}
 \end{aligned}$$

ここで、 β ：配線端が x 軸となす角度、 d ：平均結晶粒径、 $D_x = Z^* e p j_x - \kappa\Omega / N_0 (\partial N / \partial x)$ 、 $D_y = Z^* e p j_y - \kappa\Omega / N_0 (\partial N / \partial y)$ 、
を計算する支配パラメータ計算ステップ、

前記支配パラメータ計算ステップで計算された支配パラメータの値に基づき、 θ に関する原子濃度 N^* 、ここで、 N^* ：式2で表される AFD_{gb}^* に含まれる θ を0から2
 π のそれぞれの値として AFD_{gb}^* 値を計算し、その値から求める θ の値毎の原子濃
度、を計算する原子濃度 N^* 計算ステップ、

前記原子濃度 N^* 計算ステップで計算された θ の値毎に持っている原子濃度 N^* を要素
内の全てについて平均した原子濃度 N を計算する原子濃度 N 計算ステップ、

原子濃度が変化しなくなる定常状態に達したか否かを判断する判断ステップ、

前記判断ステップで定常状態に達していないと判断された場合、繰返し計算のための設
定を行って、前記支配パラメータ計算ステップへ戻って計算を繰返す繰返ステップを実行
させるためのピア接続の多層配線の信頼性を評価する信頼性評価シミュレーションプログ
ラム。

【請求項 2】

リザーバ構造を有するピア接続の多層配線について、陰極端のピア側にのみリザーバを
設け、該多層配線内部の最小原子濃度を増加させることにより、多層配線の許容電流密度
を増加させることを特徴とするピア接続の多層配線の許容電流密度向上方法。

【請求項 3】

リザーバ構造を有するピア接続の多層配線構造において、陰極端のピア側にのみリザー
バを設け、該多層配線内部の最小原子濃度を増加させることにより、多層配線の許容電流
密度を増加させることを特徴とするピア接続の多層配線構造。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、リザーバ構造を有するピア接続の多層配線について、エレクトロマイグレー
ション損傷過程におけるピア接続の多層配線の信頼性を評価する信頼性評価シミュレーシ
ョンプログラム等に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、電子デバイスの高集積化によって、金属配線の微細化が進んでいる。一方、微細
化された配線においては高密度電流およびそれに伴うジュール熱の上昇に起因して、エレ
クトロマイグレーション (Electromigration : EM) による損傷が問題となっている。

EMとは、高密度電子流による金属原子の拡散現象である。

【0003】

20

30

40

50

図 9 は、リザーバ構造を有する多層配線 50 を示す。図 9 に示されるように、ビア接続 56 を有する多層配線 50 において、配線端部 54n (陰極側 -) および 54p (陽極側 +) から外側へ張り出し部 (リザーバ) 55n および 55p を設けることにより、リザーバ効果によって E M 損傷による断線を遅延させることが知られている (非特許文献 1 参照)。この効果は、張り出し部 (リザーバ) 55n および 55p から供給される金属原子が金属配線 51、52 および 53 への原子のリザーバとなるためである。

【0004】

一方、ビア接続では E M 損傷の閾電流密度 j_{th} が存在することが知られている。従来、閾電流密度 j_{th} の評価方法の研究が行われてきた (非特許文献 2 参照)。閾電流密度 j_{th} は数値シミュレーションによっても評価され、配線における原子濃度分布の生成プロセスがシミュレーションされている。このシミュレーションは、多結晶構造配線における E M 損傷の支配パラメータ AFD_{gen}^* に基づく (非特許文献 3 参照)。このパラメータは 2 次元配線形状へ適用可能であり、種々の評価が行われている (非特許文献 4 参照)。リザーバ効果を考慮した E M 損傷評価シミュレーションの開発も試みられてきた (非特許文献 5 および 6 参照)。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

上述した非特許文献 3 ~ 6 のシミュレーションでは、ボイドが発生、成長し断線に至る E M 損傷過程のシミュレーションには至っておらず、リザーバ効果を考慮しつつ配線の信頼性を評価可能なシミュレーション手法は未だに開発されていないという問題があった。そこで、本発明の目的は上記問題を解決するためになされたものであり、リザーバ構造を有するビア接続の多層配線について、ボイドの発生に至る E M 損傷過程のシミュレーションを実施し、リザーバ効果を考慮しつつ閾電流密度を評価することにより多層配線の信頼性を評価する信頼性評価シミュレーションプログラム等を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0006】

この発明のビア接続の多層配線の信頼性を評価する信頼性評価シミュレーションプログラムは、リザーバ構造を有するビア接続の多層配線について、エレクトロマイグレーション損傷過程における多層配線の信頼性を評価する信頼性評価シミュレーションプログラムであって、コンピュータに、前記多層配線を二次元的に要素分割する要素分割ステップ、前記要素分割ステップで分割された各要素の初期原子濃度を N_0 とする初期設定ステップ、2 次元有限要素法により前記多層配線内の電流密度分布及び温度分布を計算する 2 次元有限要素法ステップ、前記 2 次元有限要素法ステップにより計算された前記多層配線内の電流密度分布及び温度分布と記録部に記録された該多層配線材料の物性定数とに基づき、単位時間に単位体積当たりエレクトロマイグレーションにより何個原子が消失するかを示す以下の支配パラメータ (陰極および陽極端の要素とビアとでは $AFD_{gen|end}^*$ 、他の要素では AFD_{gen}^*)、

【0007】

【数 1】

$$AFD_{gen}^* = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \left(AFD_{gb0}^* + \left| AFD_{gb0}^* \right| \right) d\theta \quad (3)$$

【0008】

10

20

30

40

【数 2】

$$\begin{aligned}
AFD_{gb\theta}^* = & C_{gb}^* N \frac{4}{\sqrt{3}d^2} \frac{1}{T} \exp \left\{ -\frac{Q_{gb} + \kappa\Omega(N - N_T)/N_0 - \sigma_T\Omega}{kT} \right\} \times \\
& \left\langle \sqrt{3}\Delta\varphi \left\{ (j_x \cos\theta + j_y \sin\theta) Z^* e\rho - \frac{\kappa\Omega}{N_0} \left(\frac{\partial N}{\partial x} \cos\theta + \frac{\partial N}{\partial y} \sin\theta \right) \right\} \right. \\
& - \frac{d}{2} \Delta\varphi \left\{ \left(\frac{\partial j_x}{\partial x} - \frac{\partial j_y}{\partial y} \right) Z^* e\rho \cos 2\theta - \frac{\kappa\Omega}{N_0} \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \cos\theta + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \sin\theta \right) \cos 2\theta \right. \\
& \quad \left. + \left(\frac{\partial j_x}{\partial y} + \frac{\partial j_y}{\partial x} \right) Z^* e\rho \sin 2\theta - 2 \frac{\kappa\Omega}{N_0} \frac{\partial^2 N}{\partial x \partial y} \sin 2\theta \right\} \\
& - \frac{\sqrt{3}}{4} d \frac{\kappa\Omega}{N_0} \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) - \frac{\kappa\Omega/N_0}{kT} \\
& \times \left[\frac{\sqrt{3}}{4} d \left\{ Z^* e\rho \left(j_x \frac{\partial N}{\partial x} + j_y \frac{\partial N}{\partial y} \right) - \frac{\kappa\Omega}{N_0} \left(\frac{\partial N}{\partial x} \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} \frac{\partial N}{\partial y} \right) \right\} \right. \\
& \quad \left. - \frac{d}{2} \Delta\varphi \left\{ Z^* e\rho \left(j_x \frac{\partial N}{\partial y} + j_y \frac{\partial N}{\partial x} \right) - 2 \frac{\kappa\Omega}{N_0} \frac{\partial N}{\partial x} \frac{\partial N}{\partial y} \right\} \sin 2\theta \right] \\
& + \frac{\sqrt{3}d}{4T} \left\{ \frac{Q_{gb} + \kappa\Omega(N - N_T)/N_0 - \sigma_T\Omega}{kT} - 1 \right\} \\
& \times \left\{ Z^* e\rho \left(j_x \frac{\partial N}{\partial y} + j_y \frac{\partial N}{\partial x} \right) - \frac{\kappa\Omega}{N_0} \left(\frac{\partial N}{\partial x} \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} \frac{\partial N}{\partial y} \right) \right\} \Bigg\rangle, \quad (2)
\end{aligned}$$

【0009】

ここで、 N ：原子濃度、 D_0 ：振動数項、 k ：ボルツマン定数、 T ：絶対温度、 Q_{gb} ：原子拡散の活性化エネルギー、 κ ：保護膜拘束下の濃度変化と応力変化との間の係数、 Ω ：原子体積、 σ_T ：引張の熱応力、 N_T ： σ_T が作用したときの原子濃度、 N_0 ：無応力状態における原子濃度、 Z^* ：有効電荷数、 e ：単位電荷、 ρ ：電気抵抗率、 j^* ：電流密度ベクトルの J 方向の成分、 $\partial N / \partial l$ ：原子濃度勾配の J 方向成分、 δ ：結晶粒界の有効幅、 θ ：微小単位構造と x 軸との間の角度、 d ：平均結晶粒径、 $\Delta\varphi$ ：結晶粒界間の角度に関する定数、 Q_{gb} ：粒界拡散の活性化エネルギー、 $D_x = Z^* e\rho j_x - \kappa\Omega/N_0 (\partial N / \partial x)$ 、 $D_y = Z^* e\rho j_y - \kappa\Omega/N_0 (\partial N / \partial y)$ であり、

【0010】

【数 3】

$$\begin{aligned}
AFD_{\text{gen}}^*|_{\text{end}} &= \frac{2}{\sqrt{3}\pi d^2} \frac{C_{gb}^* N}{T} \exp\left(-\frac{Q_{gb} + \kappa\Omega(N - N_T)/N_0 - \sigma_T\Omega}{kT}\right) \\
&\left[6D_x \sin\beta - 6D_y \cos\beta \right. \\
&+ \frac{\sqrt{3}}{4}\pi d \left\{ -\frac{\kappa\Omega}{N_0} \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) - \frac{\kappa\Omega/N_0}{kT} \left(D_x \frac{\partial N}{\partial x} + D_y \frac{\partial N}{\partial y} \right) \right. \\
&\left. \left. + \frac{1}{T} \left(\frac{Q_{gb} + \kappa\Omega(N - N_T)/N_0 - \sigma_T\Omega}{kT} - 1 \right) \left(D_x \frac{\partial T}{\partial x} + D_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right\} \right] \quad (4)
\end{aligned}$$

【0011】

ここで、 β ：配線端が x 軸となす角度、 d ：平均結晶粒径、 $D_x = Z^* e \rho j_x - \kappa\Omega / N_0 (\partial N / \partial x)$ 、 $D_y = Z^* e \rho j_y - \kappa\Omega / N_0 (\partial N / \partial y)$ 、を計算する支配パラメータ計算ステップ、前記支配パラメータ計算ステップで計算された支配パラメータの値に基づき、 θ に関する原子濃度 N^* 、ここで、 N^* ：式2で表される $AFD_{\text{gb}\theta}^*$ に含まれる θ を0から 2π のそれぞれの値として $AFD_{\text{gb}\theta}^*$ 値を計算し、その値から求める θ の値毎の原子濃度、を計算する原子濃度 N^* 計算ステップ、前記原子濃度 N^* 計算ステップで計算された θ の値毎に持っている原子濃度 N^* を要素内の全てについて平均した原子濃度 N を計算する原子濃度 N 計算ステップ、 $\delta N / \delta x$ 、 $\delta N / \delta y$ 等、濃度分布の計算ステップ、原子濃度が変化しなくなる定常状態に達したか否かを判断する判断ステップ、前記判断ステップで定常状態に達していないと判断された場合、繰返し計算のための設定を行って、前記支配パラメータ計算ステップへ戻って計算を繰返す繰返しステップを実行させるための多層配線の信頼性を評価する信頼性評価シミュレーションプログラムである。

20

【0012】

この発明のピア接続の多層配線の許容電流密度向上方法は、リザーバ構造を有するピア接続の多層配線について、陰極端のピア側にのみリザーバを設け、該多層配線内部の最小原子濃度を増加させることにより、多層配線の許容電流密度を増加させることを特徴とする。

30

【0013】

この発明のピア接続の多層配線構造は、リザーバ構造を有するピア接続の多層配線において、陰極端のピア側にのみリザーバを設け、該多層配線内部の最小原子濃度を増加させることにより、多層配線の許容電流密度を増加させることを特徴とする。

【発明の効果】

【0014】

本発明では、EM損傷支配パラメータを用いた本数値シミュレーションを実施することにより、集積回路配線におけるリザーバ効果の評価を行った。本数値シミュレーションは、まず電流密度分布および温度分布を2次元FE分析（有限要素法による分析。一般的には数値解析としてもよい。）により計算する。上記解析結果（電流密度分布および温度分布）とディスク等に記録された薄膜特性（配線材料の物性定数）とから各要素における上記支配パラメータ（ $AFD_{\text{gen}}^*|_{\text{end}}$ 、 AFD_{gen}^* ）を計算する。次に、 θ に関する原子濃度 N^* を上記支配パラメータの値に基づき計算する。各要素における原子濃度 N はすべての θ の値についての N^* の平均により計算する。 $\delta N / \delta x$ 、 $\delta N / \delta y$ 等、濃度分布の計算を行い、臨界原子濃度または原子濃度が変化しなくなる定常状態に達したか否かを判断し、達したと判断した場合は終了し、そうでないと判断した場合は、上記支配パラメータの計算を繰返す。

40

50

【 0 0 1 5 】

本数値シミュレーションにより、陰極端側にリザーバを設けると、配線内部の最小原子濃度が増加し、配線の許容電流密度が増加することがわかった。また、リザーバを有する配線に許容値以上の電流が作用した場合、陰極側のビア部で原子濃度はボイド発生の臨界値に到達するため、ボイド発生箇所は陰極側のビア部であると評価できた。即ち、許容値以上の電流が作用した場合、陰極側のビア部にボイドが発生することが実験事実と符合していることがわかったため、本数値シミュレーションによる結果は妥当であると言える。つまり、従来あまり行われないう陰極端側のみにリザーバを設けることを行うと、配線の許容電流密度が増加し、損傷しにくくなることがわかった。以上により、リザーバ構造を有するビア接続の多層配線について、ボイドの発生に至る E M 損傷過程の本数値シミュレーションを実施し、リザーバ効果を考慮しつつ閾（許容）電流密度を評価することにより配線の信頼性を評価するシミュレーション方法等を提供することができるという効果がある。

10

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 1 6 】

【 図 1 】 多結晶構造のモデルを示す図である。

【 図 2 】 本数値シミュレーションまたは方法の流れを示すフローチャートである。

【 図 3 】 繰返し計算による配線の原子濃度分布の時間に伴う変化をグラフで示す図である。

【 図 4 】 本数値シミュレーションで評価した 4 種類の配線構造を示す図である。

20

【 図 5 】 定常状態でのすべての要素における原子濃度 N^* の最小値と想定した電流密度 j との関係を示す図である。

【 図 6 】 サンプル 1、2 および 3 の配線に沿った原子濃度 N / N_0 の分布をグラフで示す図である。

【 図 7 】 本数値シミュレーション終了時の原子濃度分布をグラフで示す図である

【 図 8 】 本発明のシミュレーションプログラムを実行するコンピュータの内部回路 30 を示すブロック図である。

【 図 9 】 リザーバ構造を有する多層配線 50 を示す図である。

【 発明を実施するための形態 】

【 0 0 1 7 】

30

本発明では、リザーバを有する配線の信頼性評価法を開発するための第一段階として、ボイド発生に至る許容電流密度の評価と許容値以上の電流を作用させたときのボイド発生箇所の評価とを行うための E M 損傷の本発明の数値シミュレーションプログラム（または数値シミュレーション方法。以下、単に「本数値シミュレーション」と言う。）方法を開発した。以下、各実施例について図面を参照して詳細に説明する。

【 実施例 1 】

【 0 0 1 8 】

本数値シミュレーションプログラムを構築するために、E M 損傷の支配パラメータ $A F D_{gen}^*$ が用いられる（非特許文献 3 参照）。当該パラメータは E M 損傷に起因する原子流束の定式化で与えられる。原子濃度勾配（応力勾配）に起因するバックフローと拡散率における金属配線内で生成された応力の効果とを考慮した E M 原子流束 J は式 1 で与えられる（非特許文献 7 参照）。

40

【 0 0 1 9 】

【 数 4 】

$$|J| = \frac{ND_0}{kT} \exp \left\{ - \frac{Q_{gb} + \kappa \Omega (N - N_T) / N_0 - \sigma_T \Omega}{kT} \right\} \left(Z^* e \rho j^* - \frac{\kappa \Omega}{N_0} \frac{\partial N}{\partial l} \right) \quad (1)$$

【 0 0 2 0 】

ここで、 N ：原子濃度、 D_0 ：振動数項、 k ：ボルツマン定数、 T ：絶対温度、 Q_{gb} ：原子拡散の活性化エネルギー、 κ ：保護膜拘束下の濃度変化と応力変化との間の係数、 Ω ：原子体積、 σ_T ：引張の熱応力、 N_T ： σ_T が作用したときの原子濃度、 N_0 ：無応力状態における原子濃度、 Z^* ：有効電荷数、 e ：単位電荷、 ρ ：電気抵抗率、 j^* ：電流密度ベクトルの J 方向の成分、 $\partial N / \partial l$ ：原子濃度勾配の J 方向成分である。

【 0 0 2 1 】

本数値シミュレーションでは保護層で覆われた広いCu配線を想定したため、結晶粒界拡散 (grain boundary diffusion) を主要な拡散メカニズムとして仮定した。非特許文献 8、9 によれば広いCu配線 (interconnects) において、結晶粒界はEM経路 (path) となる。発明者らは原子流束発散を計算するモデルを導入した (非特許文献 10 参照)。そこで、発明者はCu配線に関しても当該モデルに基づいてEM損傷の支配パラメータを用いた。

10

【 0 0 2 2 】

微小単位構造 (後述) に出入りする原子を考慮すると、多結晶構造配線の原子流束発散は式 2 で与えられるように定式化される。

【 0 0 2 3 】

【数 5】

$$\begin{aligned}
AFD_{gb\theta}^* = & C_{gb}^* N \frac{4}{\sqrt{3}d^2} \frac{1}{T} \exp \left\{ -\frac{Q_{gb} + \kappa\Omega(N - N_T)/N_0 - \sigma_T\Omega}{kT} \right\} \times \\
& \left\langle \sqrt{3}\Delta\phi \left\{ (j_x \cos\theta + j_y \sin\theta) Z^* e\rho - \frac{\kappa\Omega}{N_0} \left(\frac{\partial N}{\partial x} \cos\theta + \frac{\partial N}{\partial y} \sin\theta \right) \right\} \right. \\
& - \frac{d}{2} \Delta\phi \left\{ \left(\frac{\partial j_x}{\partial x} - \frac{\partial j_y}{\partial y} \right) Z^* e\rho \cos 2\theta - \frac{\kappa\Omega}{N_0} \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \cos\theta + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \sin\theta \right) \cos 2\theta \right. \\
& \quad \left. + \left(\frac{\partial j_x}{\partial y} + \frac{\partial j_y}{\partial x} \right) Z^* e\rho \sin 2\theta - 2 \frac{\kappa\Omega}{N_0} \frac{\partial^2 N}{\partial x \partial y} \sin 2\theta \right\} \\
& - \frac{\sqrt{3}}{4} d \frac{\kappa\Omega}{N_0} \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) - \frac{\kappa\Omega/N_0}{kT} \\
& \times \left[\frac{\sqrt{3}}{4} d \left\{ Z^* e\rho \left(j_x \frac{\partial N}{\partial x} + j_y \frac{\partial N}{\partial y} \right) - \frac{\kappa\Omega}{N_0} \left(\frac{\partial N}{\partial x} \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} \frac{\partial N}{\partial y} \right) \right\} \right. \\
& \quad \left. - \frac{d}{2} \Delta\phi \left\{ Z^* e\rho \left(j_x \frac{\partial N}{\partial y} + j_y \frac{\partial N}{\partial x} \right) - 2 \frac{\kappa\Omega}{N_0} \frac{\partial N}{\partial x} \frac{\partial N}{\partial y} \right\} \sin 2\theta \right] \\
& + \frac{\sqrt{3}d}{4T} \left\{ \frac{Q_{gb} + \kappa\Omega(N - N_T)/N_0 - \sigma_T\Omega}{kT} - 1 \right\} \\
& \times \left\{ Z^* e\rho \left(j_x \frac{\partial N}{\partial y} + j_y \frac{\partial N}{\partial x} \right) - \frac{\kappa\Omega}{N_0} \left(\frac{\partial N}{\partial x} \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} \frac{\partial N}{\partial y} \right) \right\} \Bigg\rangle, \quad (2)
\end{aligned}$$

【0024】

ここで、 C_{gb}^* は $D_0 \delta / k$ を表しており、結晶粒界の有効幅を δ で示す。 d は平均結晶サイズ、 $\Delta\phi$ は結晶粒界間の相対角度に関連した定数、 j_x および j_y はデカルト座標系における電流密度ベクトル j の x 、 y 成分、 θ は微小単位構造と x 軸との間の角度である。図 1 (A) は多結晶構造のモデルを示し、図 1 (B) は図 1 (A) の一部拡大図 (微小単位構造) を示す。図 1 (A) 中では金属配線 (Metal line) 10 の一部拡大図が示されており、当該拡大図において金属結晶粒 12 はサイズ d の矩形 (六角形の Grain) で表されている。図 1 (B) に示される微小単位構造では結晶粒界 (Grain Boundary) 1 (アラビア数字)、2 (アラビア数字) および 3 (アラビア数字)、微小単位構造と x 軸との間の角度 θ 、定数 $\Delta\phi$ 等が示されている。

40

【0025】

式 2 の AFD_{gen}^* の正の値のみの期待値が EM 損傷を支配するパラメータ AFD_{gen}^* を表し、多結晶構造配線におけるボイド形成に関して式 3 が得られる。

【0026】

50

【数 6】

$$AFD_{\text{gen}}^* = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \left(AFD_{\text{gb}\theta}^* + \left| AFD_{\text{gb}\theta}^* \right| \right) d\theta \quad (3)$$

【0027】

式 3 は単位時間、単位体積当たりで減少する原子数を意味する。

【0028】

10

配線端部では、原子流に関する境界条件を上記パラメータの形成に与える必要がある。つまり、配線の陰極端では原子の流入はなく陽極端では原子の流出はないからである。当該境界条件は、可能なゼロ流束を図 1 (B) に示される微小単位構造内に各 θ 範囲について割当てることにより表すことができる。表 1 は原子流束に関する上記境界条件を示す（非特許文献 11 参照）。表 1 中の J_1 （アラビア数字）、 J_2 （アラビア数字）、 J_3 （アラビア数字）等の 1（アラビア数字）、2（アラビア数字）および 3（アラビア数字）は図 1 の結晶粒界（Grain Boundary）1（アラビア数字）、2（アラビア数字）および 3（アラビア数字）の 1（アラビア数字）、2（アラビア数字）および 3（アラビア数字）である。

【0029】

20

【表 1】

Range -I	Range -II	Range -III
$-2\pi/3 + \Delta\phi + \beta < \theta \leq -\pi/3 - \Delta\phi + \beta$	$-\pi/3 - \Delta\phi + \beta < \theta \leq \beta$	$\beta < \theta \leq \pi/3 + \Delta\phi + \beta$
$J_I = J_{II} = 0$	$J_I = 0$	$J_I = J_{II} = 0$
Range -IV	Range -V	Range -VI
$\pi/3 + \Delta\phi + \beta < \theta \leq 2\pi/3 - \Delta\phi + \beta$	$2\pi/3 - \Delta\phi + \beta < \theta \leq \pi + \beta$	$\pi + \beta < \theta \leq 4\pi/3 + \Delta\phi + \beta$
$J_I = 0$	$J_I = J_{II} = 0$	$J_{II} = 0$

【0030】

以上より、図 1 (B) に示される微小単位構造内の原子の出入りを考慮すると、ピア接続配線端部における原子流束発散 AFD_{gen}^* は式 4 により与えられる。

【0031】

【数 7】

$$\begin{aligned}
AFD_{\text{gen}}^*|_{\text{end}} &= \frac{2}{\sqrt{3}\pi d^2} \frac{C_{gb}^* N}{T} \exp\left(-\frac{Q_{gb} + \kappa\Omega(N - N_0)/N_0 - \sigma_T\Omega}{kT}\right) \\
&\left[6D_x \sin\beta - 6D_y \cos\beta \right. \\
&+ \frac{\sqrt{3}}{4} \pi d \left\{ -\frac{\kappa\Omega}{N_0} \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) - \frac{\kappa\Omega/N_0}{kT} \left(D_x \frac{\partial N}{\partial x} + D_y \frac{\partial N}{\partial y} \right) \right. \\
&\left. \left. + \frac{1}{T} \left(\frac{Q_{gb} + \kappa\Omega(N - N_0)/N_0 - \sigma_T\Omega}{kT} - 1 \right) \left(D_x \frac{\partial T}{\partial x} + D_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right\} \right] \quad (4)
\end{aligned}$$

【0032】

ここで、 δ ：結晶粒界の有効幅、 β ：配線端が x 軸となす角度（図1（B）参照）、 d ：平均結晶粒径、 Q_{gb} ：粒界拡散の活性化エネルギー、 $D_x = Z^* e \rho j_x - \kappa\Omega/N_0 (\partial N/\partial x)$ 、 $D_y = Z^* e \rho j_y - \kappa\Omega/N_0 (\partial N/\partial y)$ である。原子流束勾配 $AFD_{\text{gen}}^*|_{\text{end}}$ は結晶粒界における流束発散の量を表し、単位時間、単位体積当たりで減少する原子数を意味する。

20

【0033】

上記EM損傷の支配パラメータを用いて、配線内における原子濃度分布の本数値シミュレーションを数種類の入力電流密度 j 、基板温度 T_s を条件として実行した。評価される配線は二次元的に要素分割し、原子濃度分布の生成プロセスは上記支配パラメータに基づき各要素の原子濃度を変化させながらシミュレートした。温度に関する境界条件は配線の両端に与え、電流密度に関する境界条件はビア位置に与えた。原子流は金属配線の周囲では遮断した。端部のパラメータである $AFD_{\text{gen}}^*|_{\text{end}}$ は陰極および陽極端の要素とビアとで用い、 AFD_{gen}^* は他の要素で用いた。

【0034】

図2は、本数値シミュレーションまたは方法の流れをフローチャートで示す。図2に示されるように、要素の初期原子濃度を N_0 とする。まず、電流密度分布および温度分布を2次元FE分析（有限要素法。一般的には数値解析としてもよい。）により計算する（ステップS10）。上記分析結果（電流密度分布および温度分布）とディスク38（後述）等に記録された薄膜特性（配線材料の物性定数。非特許文献4参照）とから各要素における上記支配パラメータ（ $AFD_{\text{gen}}^*|_{\text{end}}$ 、 AFD_{gen}^* ）を計算する（ステップS12、S14）。時間経過に伴い配線内の原子濃度分布は変化し、これら支配パラメータ値も変化する。次に、 θ に関する原子濃度 N^* を上記支配パラメータの値に基づき計算する。各要素における原子濃度 N はすべての θ の値についての N^* の平均により計算する。 $\delta N/\delta x$ 、 $\delta N/\delta y$ 等の濃度分布の計算も行う（以上、ステップS16）。臨界原子濃度または原子濃度が変化しなくなる定常状態に達したか否かを判断し（ステップS18）、達したと判断した場合は終了し、そうでないと判断した場合はステップS14へ戻って計算を繰返す。繰返すときは、ステップS16の結果の、 N 、 $\delta N/\delta x$ 、 $\delta N/\delta y$ を使って、ステップS14の計算を行う。

30

40

【0035】

本数値シミュレーションでは各要素に2種類の原子濃度（ N^* 、 N ）を使っている。一つは、式2で表される AFD_{gb}^* に含まれる θ （図1参照）を0から 2π のそれぞれの値として AFD_{gb}^* 値を計算し、その値から求める原子濃度（ N^* ）である。よって、 N^* は θ の値毎に計算される。もう一つは、 θ の値毎に持っている N^* を要素内の全について平均した原子濃度 N である。この N が要素の原子濃度として、式2で用いられている。原子濃度の初期値 N_0 からEM損傷前の要素内の原子数がわかる。 AFD_{ge}^*

50

n または $A F D_{gen|end}^*$ は、単位時間に単位体積当たり $E M$ により何個原子が消失するかを求めるパラメータであるから、この値から 1 計算ステップの間にどのくらい要素から原子が消失するかを計算することができ、時間経過後の要素の原子濃度 N を求めることができる。要素の原子濃度 N (とその勾配 $\delta N / \delta x$ 、 $\delta N / \delta y$ 等も) が変化すると、それらの関数である $A F D_{gen}^*$ または $A F D_{gen|end}^*$ の値も変化する。これによる時間ステップを進行させた繰り返し計算を行う。繰り返し計算はある入力電流密度を仮定して行う。

【0036】

図 3 は、繰り返し計算による配線の原子濃度分布の時間に伴う変化をグラフで示す。図 3 で横軸は配線中央部 (図 4 参照) からの距離 (μm 。負が陰極側で正が陽極側)、縦軸は原子濃度 (N / N_0) である。原図では繰り返し数 (step、時間の経過) が色分けされて示されている (青色: 5000 ステップ、赤色: 10,000 ステップ、緑色: 20,000 ステップ、紫色: 30,000 ステップ)。図 3 に示されるように、繰り返し数が多くなるほど (時間の経過に伴い)、同じ位置における原子濃度は変化していき、十分に時間が経過すると原子濃度が変化しなくなる定常状態になることがわかる。図 3 に示されるように、時間経過に伴い、要素毎の N^* 、さらには N が変化していき、その後濃度分布が定常状態になる。

【0037】

図 4 は、本数値シミュレーションで評価した 4 種類の配線構造を示す。図 4 で図 9 と同じ符号を付した箇所は同じ要素を示すため、説明は省略する。図 4 (A) は両端にリザーバがないサンプル 1 を示し、図 4 (B) は陰極ビアにリザーバを配置したサンプル 2 を示し、図 4 (C) は陽極ビアにリザーバを配置したサンプル 3 を示し、図 4 (D) は陰極ビアおよび陽極ビアの両方にリザーバを配置したサンプル 4 を示す。図 4 (A) ~ (D) に示すような直線形状の Cu 配線を想定し、リザーバの有無が閾電流密度の大きさに与える影響を評価した。図 4 (A) ~ (D) に示すように、リザーバがない場合 (サンプル 1)、陽極端から密度 j の電流を入力し、陰極端から j の電流を出力する (矢印参照)。両端に想定したビア間の距離は 150 (μm)、配線 52 の幅 W は 10 (μm)、厚さ t は 410 (nm) である。リザーバがある場合 (サンプル 2 および 3) も同様に 150 (μm) 離れたビア間で密度 j の電流を入出力した。張り出し部 55n、55P の長さはいずれも 25 (μm) である。本数値シミュレーションは各々のサンプルにおいて、基板温度 573 (K) 下で、3 種類の電流密度を想定して実施した。

【0038】

本数値シミュレーションにおいて、 Cu 配線は表 2 で示される特性定数を有するものと想定した (非特許文献 12 ~ 16 参照)。

【0039】

【表 2】

Characteristic constants	Value	Reference
$D_0 [\mu\text{m}^2/\text{s}]$	3.35	[8]
$Q_{gb} [\text{eV}]$	1.1	[9]
$\Omega [\mu\text{m}^3]$	3.00×10^{11}	
Z^*	1	[10]
$\rho_0 [\Omega\mu\text{m}]$	0.0345 at 573[K]	
$\alpha [\text{K}^{-1}]$	0.0043 at 573[K]	[11]
$\kappa [\text{GPa}]$	42.5	} Cited from results for Al interconnect
$N_{min}^* [\mu\text{m}^{-3}]$	8.40×10^{10}	
$N_{max}^* [\mu\text{m}^{-3}]$	8.56×10^{10}	
$d [\mu\text{m}]$	0.8	

【0040】

入力電流密度は、0.2、0.4および0.6 (MA/cm²) の3つの値を想定した。環境温度はすべてのサンプル1～4において573 (K) と想定した。

【0041】

想定した電流密度が小さい場合は、配線内の原子濃度 N^* の最小値がボイド形成に至る臨界の原子濃度 N_{min}^* に達することなく配線内の原子濃度分布が変化しなくなる定常状態となる。配線内における原子濃度の最小値がちょうど N_{min}^* に一致する電流密度を閾電流密度とし、配線の許容電流密度として評価する。閾電流密度より小さい電流密度で本数値シミュレーションを実行後、原子濃度分布の定常状態を得た。図5 (A) は、定常状態でのすべての要素における原子濃度 N^* の最小値と想定した電流密度 j との関係を示すグラフである。図5 (A) で横軸は電流密度 (MA/cm²)、縦軸は最小原子濃度 (N^*/N_0) であり、各サンプル1～4毎にプロットした。詳しくは、定常状態になった原子濃度 N^* の配線内での最小値を、仮定した入力電流密度に対してプロットした。図5 (A) に示されるように、各サンプル1～4のプロットを結ぶ線と臨界の原子濃度 (N_{min}^*/N_0) の線との交点から閾電流密度が評価される。図5 (B) はこのようにして評価された各サンプル1～4についての閾電流密度 j_{th} (MA) を示す。配線内の原子濃度 N^* が N_{min}^* の値に達するとボイドができて損傷するモデルとなっているため、定常になった時にちょうど配線内の原子濃度 N^* の最小値が N_{min}^* の値になる入力電流密度を図5 (A) に示されるグラフの交点から求め、それを閾電流密度 j_{th} として評価する。

【0042】

図5(A)、(B)に示されるように、サンプル1と4の閾電流密度 j_{th} はほとんど同じである。これに対して、サンプル2では閾電流密度 j_{th} はサンプル1および4の閾電流密度 j_{th} より大きい。サンプル3では閾電流密度 j_{th} はサンプル1および4の閾電流密度 j_{th} より小さい。リザーバが陰極ピア側に配置されたサンプル2の場合、閾電流密度 j_{th} は他のサンプルより大きくなった。これは、定常状態におけるピア間通電部の原子濃度分布はサンプル1と3とでは変化しないが、サンプル2の分布はそれらよりも高い濃度となり配線内の原子濃度の最小値も増加したためと考えられる。つまり、サンプル2は他の形状のサンプルよりも多く電流を流すことができるため、EM損傷しにくい形状であるということができる。

10

【0043】

図6は、サンプル1、2および3の配線に沿った原子濃度 N/N_0 の分布を示すグラフである。図6で横軸は配線中央部(図4参照)からの距離(μm 。負が陰極側で正が陽極側)、縦軸は原子濃度(N/N_0)であり、サンプル1は実線、サンプル2は破線、サンプル3はピッチの短い破線で示す。サンプルはすべて入力電流密度が等しい。式1によれば、電流密度が等しい場合、EMの駆動力は等しい。このため、定常状態では原子濃度の傾きは互いに対応している。一方、リザーバでは電流密度はほとんどゼロであり、EMの駆動力はない。従って、定常状態ではリザーバにおける傾きはほとんど水平となる。質量の法則によれば、サンプル2における原子濃度分布はサンプル1における分布から広域的に上方へシフトすることになる。

20

【0044】

図7は、本数値シミュレーション終了時の原子濃度分布を示すグラフである。図7で横軸は配線中央部(図4参照)からの距離(μm 。負が陰極側で正が陽極側)、縦軸は原子濃度 N^* ($1/\mu m^3$)、入力電流密度 $j = 2.0$ (MA/cm^2) でありサンプル3について示す。図7は N^* の分布であるため、各要素に複数の N^* がありそれらをプロットしていることから、太い線にみえている。図7に示されるように、陰極側のピア部において濃度が N_{min}^* に達し、ボイドが発生すると考えられた。この結果は実験におけるボイド発生箇所(非特許文献17参照)に一致する。

【0045】

以上より、本発明の実施例1によれば、EM損傷支配パラメータを用いた本数値シミュレーションを実施することにより、集積回路配線におけるリザーバ効果の評価を行った。本数値シミュレーションは、まず電流密度分布および温度分布を2次元FE分析(有限要素法。一般的には数値解析でもよい。)により計算する。上記解析結果(電流密度分布および温度分布)とディスク38(後述)等に記録された薄膜特性(配線材料の物性定数。非特許文献4参照)とから各要素における上記支配パラメータ($AFD_{genlend}^*$ 、 AFD_{gen}^*)を計算する。次に、 θ に関する原子濃度 N^* を上記支配パラメータの値に基づき計算する。各要素における原子濃度 N はすべての θ の値についての N^* の平均により計算する。臨界原子濃度または原子濃度が変化しなくなる定常状態に達したか否かを判断し、達したと判断した場合は終了し、そうでないと判断した場合は上記支配パラメータの計算を繰返す。本数値シミュレーションにより、陰極端側にリザーバを設けると、配線内部の最小原子濃度が増加し、配線の許容電流密度が増加することがわかった。また、リザーバを有する配線に許容値以上の電流が作用した場合、陰極側のピア部で原子濃度はボイド発生臨界値に到達するため、ボイド発生箇所は陰極側のピア部であると評価できた。即ち、許容値以上の電流が作用した場合、陰極側のピア部にボイドが発生することが実験事実と符合していることがわかったため、本数値シミュレーションによる結果は妥当であると言える。つまり、従来あまり行われなかった陰極端側のみにリザーバを設けることを行くと、配線の許容電流密度が増加し、損傷しにくくなることがわかった。以上により、リザーバ構造を有するピア接続の多層配線について、ボイドの発生に至るEM損傷過程の本数値シミュレーションを実施し、リザーバ効果を考慮しつつ閾電流密度を評価することにより配線の信頼性を評価するシミュレーション方法等を提供することができた。リザ

30

40

50

ーバ構造を有するビア接続の多層配線構造において、陰極端のビア側にのみリザーバを設け、当該多層配線内部の最小原子濃度を増加させることにより、多層配線の許容電流密度を増加させるビア接続の多層配線構造を提供することができた。

【実施例 2】

【0046】

図 8 は、本発明のシミュレーションプログラムを実行する PC 等のコンピュータの内部回路 30 を示すブロック図である。図 8 に示されるように、CPU 31、ROM 32、RAM 33、画像制御部 36、コントローラ 37、入力制御部 40 および外部 I/F 部 42 はバス 43 に接続されている。図 8 において、上述の本発明のシミュレーションプログラムは、ROM 32、ディスク 38 または DVD 若しくは CD-ROM 39 等の記録媒体（脱着可能な記録媒体を含む）に記録されている。ディスク 38 等の記録媒体（記録部）には、上述した表 2 で示される物性定数等の薄膜特性が記録されている。シミュレーションプログラムは、ROM 32 からバス 43 を介し、あるいはディスク 38 または DVD 若しくは CD-ROM 39 等の記録媒体からコントローラ 37 を経由してバス 43 を介し RAM 33 へロードされる。画像制御部 36 は、シミュレーションプログラムによる計算結果のデータを VRAM 35 へ送出する。表示部 34 は VRAM 35 から送出された上記データ等を表示する。VRAM 35 は表示部 34 の一画面分のデータ容量に相当する容量を有している画像メモリである。入力操作部 41 はコンピュータに入力、指定等を行うためのマウス、キーボード、タッチパネル、スイッチ等の入力装置であり、入力制御部 40 は入力操作部 41 と接続され入力制御等を行う。外部 I/F 部 42 はコンピュータ（CPU）31 の外部と接続する際のインタフェース機能を有している。

【0047】

上述のようにコンピュータ（CPU）31 が本発明のシミュレーションプログラムを実行することにより、本発明の目的を達成することができる。シミュレーションプログラムは上述のように DVD 若しくは CD-ROM 39 等の記録媒体の形態でコンピュータ（CPU）31 に供給することができ、シミュレーションプログラムを記録した DVD 若しくは CD-ROM 39 等の記録媒体も同様に本発明を構成することになる。シミュレーションプログラムを記録した記録媒体としては上述された記録媒体の他に、例えばメモリ・カード、メモリ・スティック、光ディスク等を用いることができる。

【産業上の利用可能性】

【0048】

本発明の活用例として、ビア接続を有する多層配線（特に集積回路配線）における許容電流密度の向上（増加）に適用することができる。

【符号の説明】

【0049】

10 金属配線、12 金属結晶粒、30 コンピュータの内部回路、31 CPU、32 ROM、33 RAM、34 表示部、35 VRAM、36 画像制御部、37 コントローラ、38 ディスク、39 DVD 若しくは CD-ROM、40 入力制御部、41 入力操作部、42 外部 I/F 部、43 バス、50 多層配線、51、52、53 金属配線、54n、54P 配線端部、55n、55p 張り出し部（リザーバ）、56 ビア接続。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0050】

【非特許文献 1】Fu, C. M. et al., Width Dependence of The Effectiveness of ReservoirLength in Improving Electromigration for Cu/Low-k Interconnects, Microelectronics Reliability, Vol.50, No.9-11, (2010), pp.1332-1335.

【非特許文献 2】e.g. Hau-Riege, C.S., Microelectronics Reliability, Vol.44 (2004), pp.195-205.

【非特許文献 3】Abe, H., Sasagawa, K. and Saka, M., International Journal of Frac

10

20

30

40

50

ture, Vol.138 (2006), pp.219-240.

【非特許文献 4】Sasagawa, K. et al., Evaluation of Threshold Current Density of Electromigration Damage in Interconnect Tree with Angled Cu Lines, Proc. 12th Int. Conf. on Electronics Materials and Packaging, (2010), pp.110-116.

【非特許文献 5】Hieu, N. V. et al., Effect of Current Crowding on Electromigration on Lifetime Investigated by Simulation and Experiment, Computational Materials Science, Vol.49 (2010), pp. S235-S238.

【非特許文献 6】Tan, C. M. et al., Applications of Finite Element Methods for Reliability Study of ULSI Interconnections, Microelectronics Reliability, in Press.

【非特許文献 7】Sasagawa, K. et al., Governing Parameter for Electromigration Damage in the Polycrystalline Line with a Passivation Layer, Journal of Applied Physics, Vol.91, (2002), pp.1882-1890.

【非特許文献 8】Lin, M. H., Chang, K. P., Su, K. C. and Wang, T. Microelectronics Reliability, Vol.47, (2007), pp.2100-2108.

【非特許文献 9】Hu, C. -K., R. Rosenberg, and K. Y. Lee, Applied Physics Letters, Vol.74, Iss.20 (1999), pp.2945-2947.

【非特許文献 10】Sasagawa, K., Hasegawa, M., Saka, M. and Abe, H., Journal of Applied Physics, Vol.91, (2002), pp.1882-1890.

【非特許文献 11】Hasegawa, M., Sasagawa, K., Saka, M. and Abe, H., Proc. of IPACK '03 (CD-ROM), ASME (2003), IPACK2003-35064.

【非特許文献 12】Choi, Z. S., Ronig, R. and Thompson, C. V., Journal of Applied Physics, Vol. 102(2007), 083509.

【非特許文献 13】Hu, C. K., Gignac, L. and Rosenberg, R., Microelectronics Reliability, Vol. 46, (2006), pp.213-231.

【非特許文献 14】Gan, C. L., Thompson, C. V., Pey, K. L., and Choi, W. K., Journal of Applied Physics, Vol. 94, (2003), pp.1222-1228.

【非特許文献 15】Figliola, R. S., Beasley, D. E., Theory and Design for Mechanical Measurements, Second-ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., (1995).

【非特許文献 16】Sasagawa, K., Hasegawa, M., Yoshida, N., Saka, M. and Abe, H., Proc. of InterPACK '03 (CD-ROM), ASME, 2003, IPACK2003-35065.

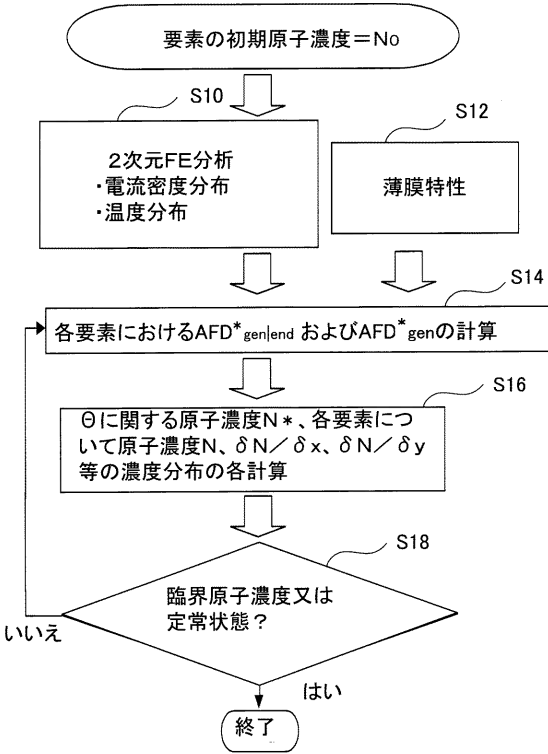
【非特許文献 17】Vairagar, A. V. et al., Reservoir Effect on Electromigration Mechanisms in Dual-damascene Cu Interconnect Structures, Microelectronic Engineering, Vol.82, (2005), pp.675-679.

10

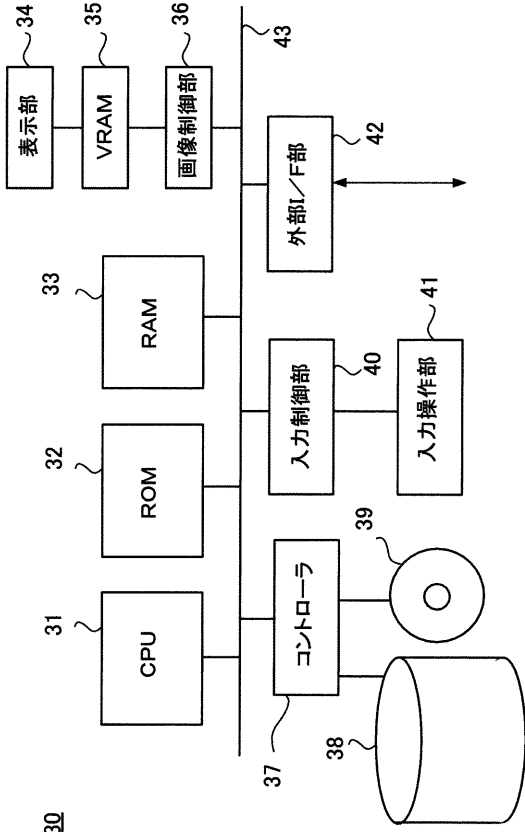
20

30

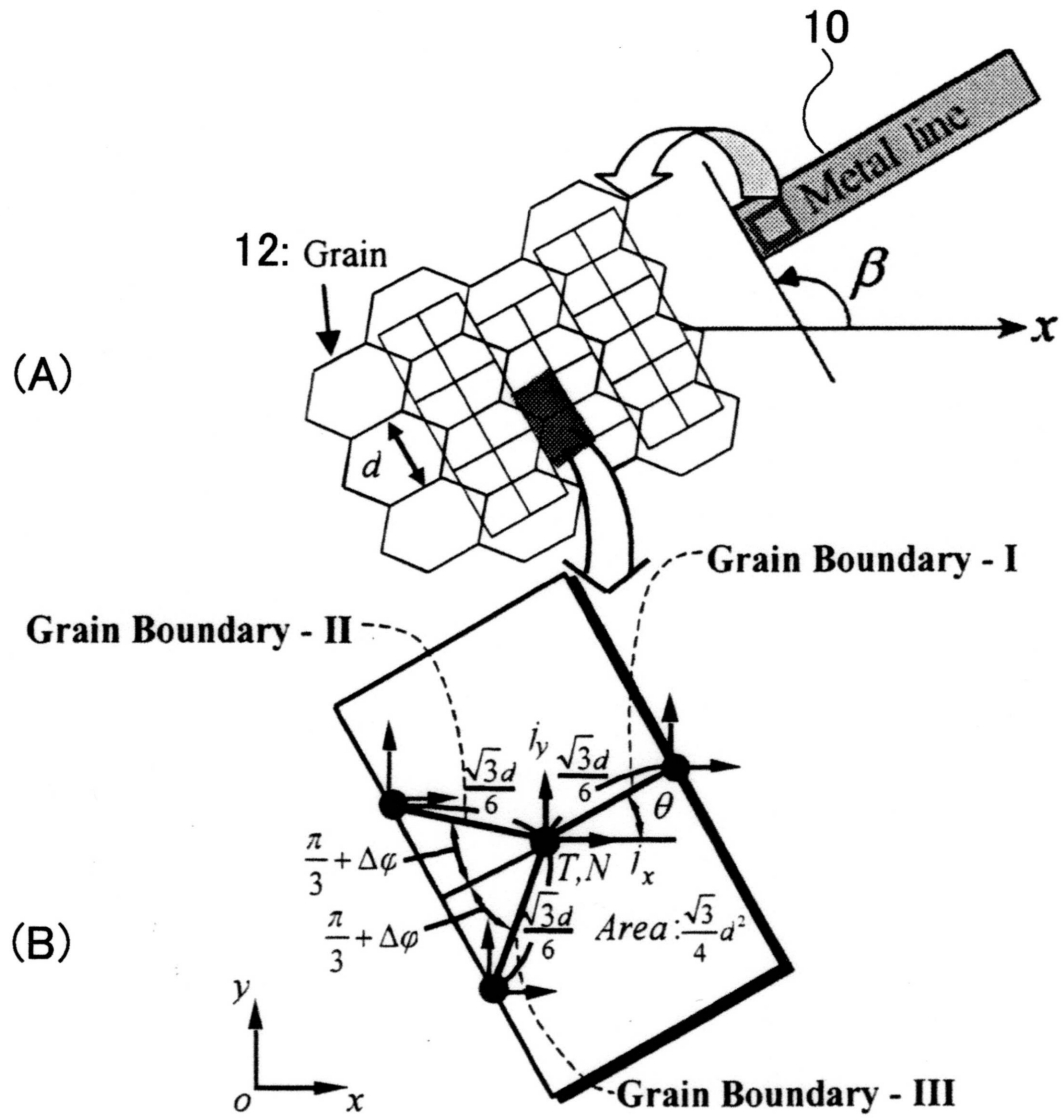
【図 2】



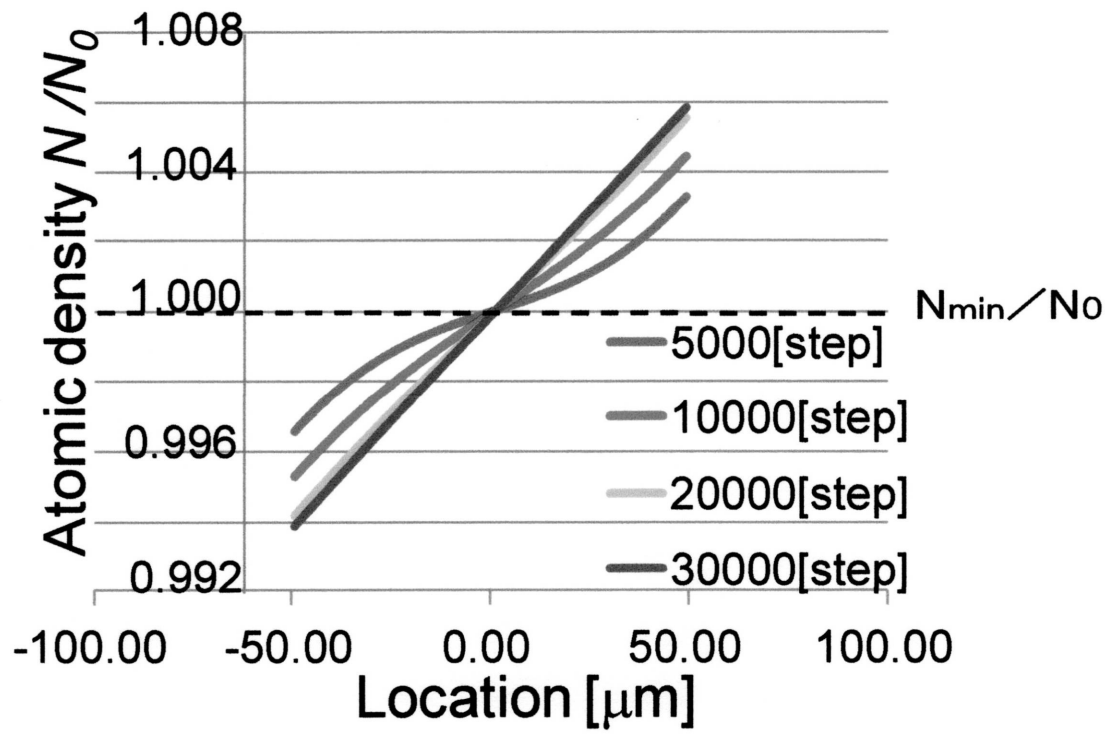
【図 8】



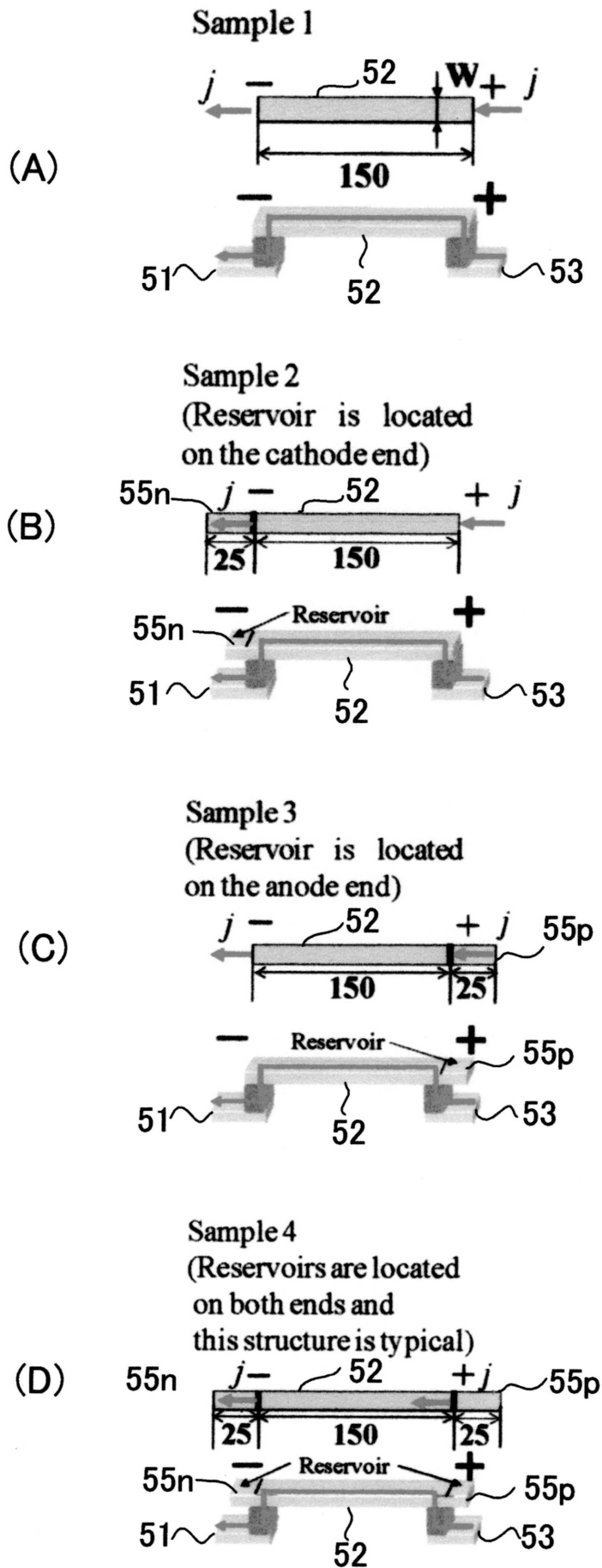
【図 1】



【図 3】

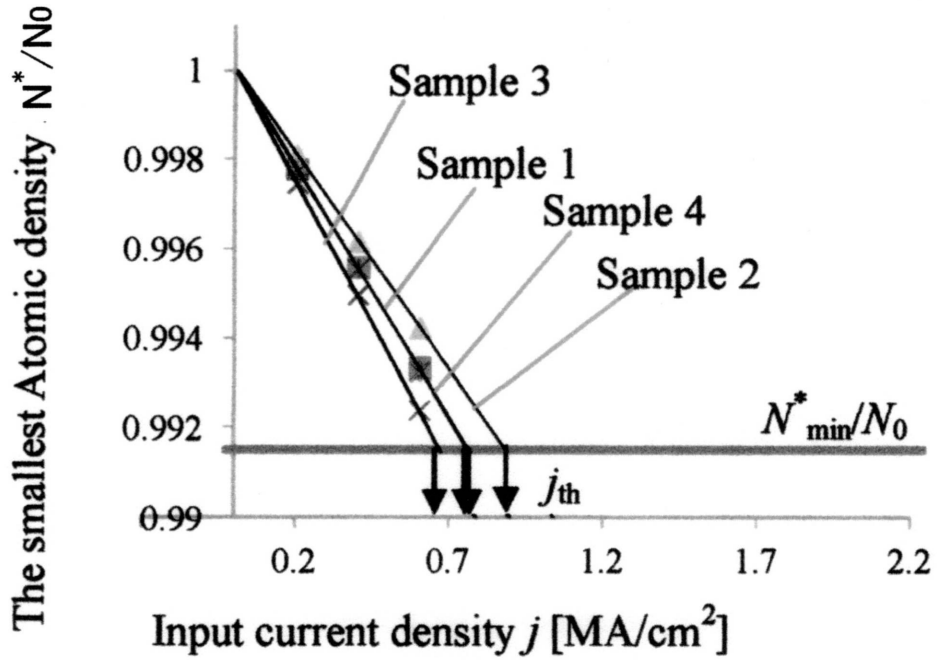


【 図 4 】



【図 5】

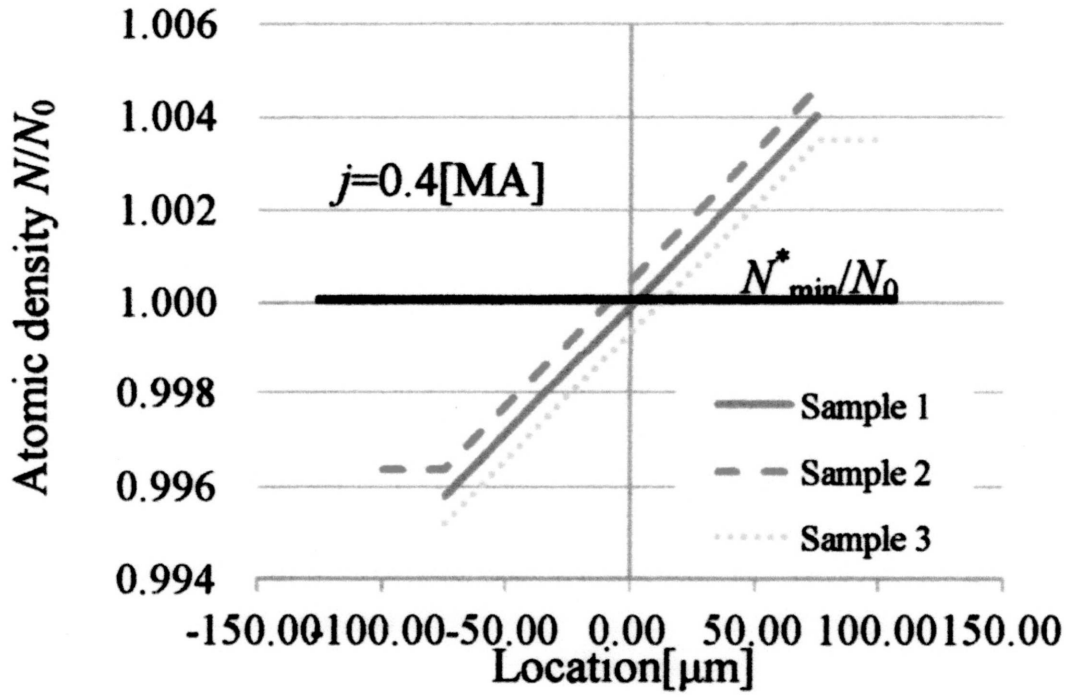
(A)



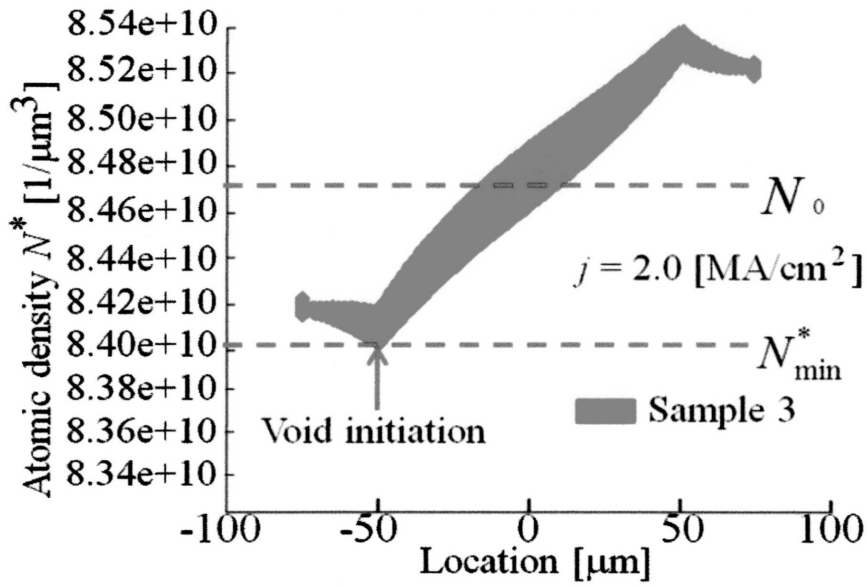
(B)

Threshold current density j_{th} [MA]				
Sample 1	0.7701		Sample 3	0.6731
Sample 2	0.8813		Sample 4	0.7565

【図 6】



【図 7】



【図 9】

50