

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6044926号
(P6044926)

(45) 発行日 平成28年12月14日(2016. 12. 14)

(24) 登録日 平成28年11月25日(2016. 11. 25)

(51) Int. Cl.	F I	
G06F 17/50 (2006.01)	G06F 17/50	666Y
H01L 21/82 (2006.01)	G06F 17/50	658J
	H01L 21/82	T

請求項の数 3 (全 19 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2012-196681 (P2012-196681)</p> <p>(22) 出願日 平成24年9月6日(2012. 9. 6)</p> <p>(65) 公開番号 特開2014-52832 (P2014-52832A)</p> <p>(43) 公開日 平成26年3月20日(2014. 3. 20)</p> <p>審査請求日 平成27年4月6日(2015. 4. 6)</p> <p>特許法第30条第2項適用 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</p>	<p>(73) 特許権者 504229284 国立大学法人弘前大学 青森県弘前市文京町1番地</p> <p>(74) 代理人 100108372 弁理士 谷田 拓男</p> <p>(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</p> <p>審査官 台田 幸裕</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

最終頁に続く

(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) 【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 $A F D^*_{genlend}$ 、他の要素では $A F D^*_{gen}$)、

【数 1】

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

【数 2】

$$\begin{aligned} AFD_{\text{gb}\theta}^* = & C_{\text{gb}}^* N \frac{4}{\sqrt{3}d^2} \frac{1}{T} \exp \left\{ - \frac{Q_{\text{gb}} + \kappa\Omega(N - N_{\text{T}})/N_0 - \sigma_{\text{T}}\Omega}{kT} \right\} \times \\ & \left\{ \sqrt{3}\Delta\phi \left(j_x \cos\theta + j_y \sin\theta \right) 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\} \\ & - \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}{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_{\text{gb}} + \kappa\Omega(N - N_{\text{T}})/N_0 - \sigma_{\text{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\}, \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、 $\Delta\phi$ ：原子体積、 σ_{T} ：引張の熱応力、 N_{T} ： 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_x^* ：電流密度ベクトルの J 方向の成分、 N_x/N_0 ：原子濃度勾配の J 方向成分、 $\Delta\phi$ ：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、 $D_x = Z^* e j_x - \Delta\phi / N_0 (N_x / x)$ 、 $D_y = Z^* e j_y - \Delta\phi / N_0 (N_y / y)$ であり、

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】

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EM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EM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EM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EM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、ポイドが発生、成長し断線に至るEM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、ポイドの発生に至るEM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】

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

【0008】

【数 2】

$$\begin{aligned}
AFD_{\text{gb}\theta}^* = & C_{\text{gb}}^* N \frac{4}{\sqrt{3}d^2} \frac{1}{T} \exp \left\{ -\frac{Q_{\text{gb}} + \kappa\Omega(N - N_T)/N_0 - \sigma_T\Omega}{kT} \right\} \times \\
& \left\{ \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. \\
& \left. \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\} \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}{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. \\
& \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_{\text{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\}, \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、 V ：原子体積、 σ_T ：引張の熱応力、 N_T ： 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_x^* ：電流密度ベクトルの x 方向の成分、 N/x ：原子濃度勾配の x 方向成分、 d ：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、 $D_x = Z^* e j_x - \kappa\Omega / N$ 、 $D_y = Z^* e j_y - \kappa\Omega / N$ であり、

【 0 0 1 0 】

【 数 3 】

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

【 0 0 1 1 】

ここで、 β : 配線端が x 軸となす角度、 d : 平均結晶粒径、 $D_x = Z^* e^{-j_x} / N_0 (N / x)$ 、 $D_y = Z^* e^{-j_y} / N_0 (N / y)$ 、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、 β 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 β 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 N^* 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 N^* 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、 N / x 、 N / 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。

【 0 0 1 2 】

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、本発明の信頼性評価シミュレーションプログラムの実行結果から得られた、定常状態における配線内の原子濃度の最小値がボイド形成に至る臨界の原子濃度の値に一致する際の入力電流密度（閾電流密度）の評価に基づき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。

【 0 0 1 3 】

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構造において、本発明の信頼性評価シミュレーションプログラムの実行結果から得られた、定常状態における配線内の原子濃度の最小値がボイド形成に至る臨界の原子濃度の値に一致する際の入力電流密度（閾電流密度）の評価に基づき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 】

【 0 0 1 4 】

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($A F D_{gen}^{*end}$ 、 $A F D_{gen}^{*}$)を計算する。次に、 N^* 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 N^* の値についての N^* の平均により計算する。 N/x 、 N/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。

【0015】

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かった陰極端側だけ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(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。

【図面の簡単な説明】

【0016】

【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。

【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 との関係をグラフで示す図である。

【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】

【0017】

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EM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】

【0018】

本数値シミュレーションプログラムを構築するために、EM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EM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EM原子流束 J は式1で与えられる(非特許文献7参照)。

【0019】

【数 4】

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

【0020】

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 ： 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。

10

【0021】

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。

【0022】

微小単位構造 (後述) に入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。

20

【0023】

【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. + \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\} \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}{kT} \\
&\quad \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\} \\
&\quad \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/k を表しており、結晶粒界の有効幅を d 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 $AFD_{gb\theta}^*$ の正の値のみの期待値が EM 損傷を支配するパラメータ $AFD_{ge n}^*$ を表し、多結晶構造配線におけるポイド形成に関して式 3 が得られる。

【0026】

【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】

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】

【表1】

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

【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】

10

20

【数 7】

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

【0032】

ここで、 β : 結晶粒界の有効幅、 θ : 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、 $D_x = Z^* e^{-\theta} j_x - \dots / N_0$ (N / x)、 $D_y = Z^* e^{-\theta} j_y - \dots / N_0$ (N / y) である。原子流束勾配 $AFD_{\text{gen}}^* \Big|_{\text{end}}$ 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 $AFD_{\text{gen}}^* \Big|_{\text{end}}$ 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 S 10)。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 ($AFD_{\text{gen}}^* \Big|_{\text{end}}$ 、 AFD_{gen}^*) を計算する (ステップ S 12、S 14)。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、 N^* 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 N^* の値についての N^* の平均により計算する。 N / x 、 N / y 等の濃度分布の計算も行う (以上、ステップ S 16)。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 S 18)、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 S 14 へ戻って計算を繰返す。繰返すときは、ステップ S 16 の結果の、 N 、 N / x 、 N / y を使って、ステップ S 14 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 β (図 1 参照) を 0 から 2 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 β の値毎に計算される。もう一つは、 N の値毎に持っている N^* を要素内の全て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

また $A F D_{gen}^*$ または $A F D_{gen}^*$ は、単位時間に単位体積当たり EM 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 N/x 、 N/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 $A F D_{gen}^*$ 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) は陰極ピアにリザーバを配置したサンプル 2 を示し、図 4 (C) は陽極ピアにリザーバを配置したサンプル 3 を示し、図 4 (D) は陰極ピアおよび陽極ピ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)。両端に想定したピア間の距離は 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) 離れたピア間で密度 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} [eV]	1.1	[9]	
Ω [μm^3]	3.00×10^{11}		
Z^*	1	[10]	
ρ_0 [$\Omega\mu\text{m}$]	0.0345 at 573 [K]		
α [K^{-1}]	0.0043 at 573 [K]	[11]	
κ [GPa]	42.5	} Cited from results for Al interconnect	
N_{min}^* [μm^{-3}]	8.40×10^{10}		[12]
N_{max}^* [μm^{-3}]	8.56×10^{10}		[12]
d [μm]	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。リザーバが陰極ビ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^* ($1/\mu\text{m}^3$)、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、 $AFD_{genlend}^*$ 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 $AFD_{genlend}^*$ 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、 54 n、54 P 配線端部、 55 n、55 p 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 Reservoir Length 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 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 Pres

10

s.
【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.

20

【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.

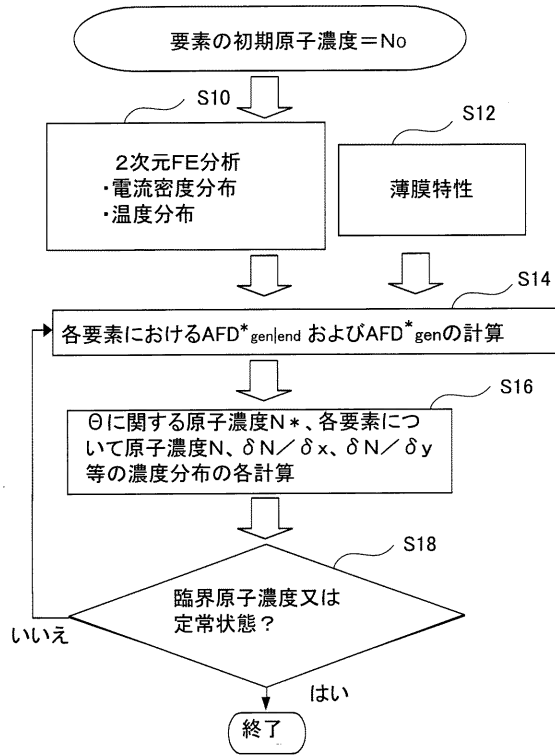
【非特許文献 15】Figliola, R. S., Beasley, D. E., Theory and Design for Mechanical Measurements, Second ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., (1995).

【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.

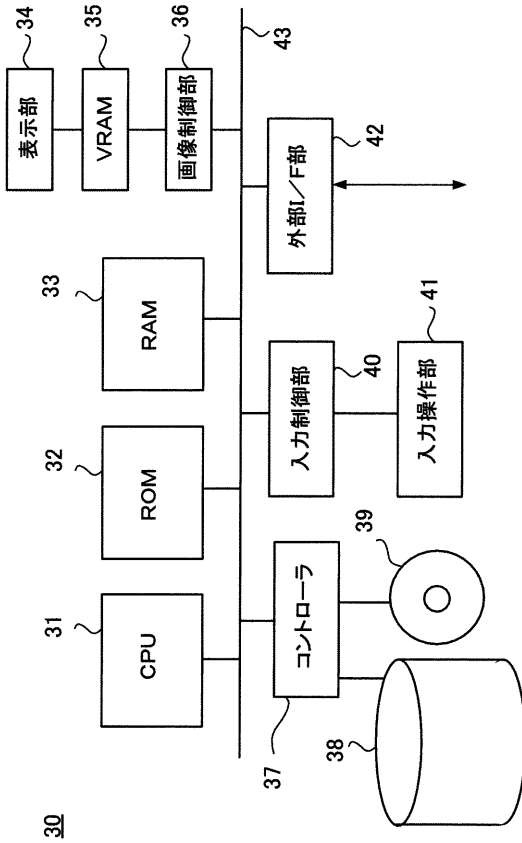
30

【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.

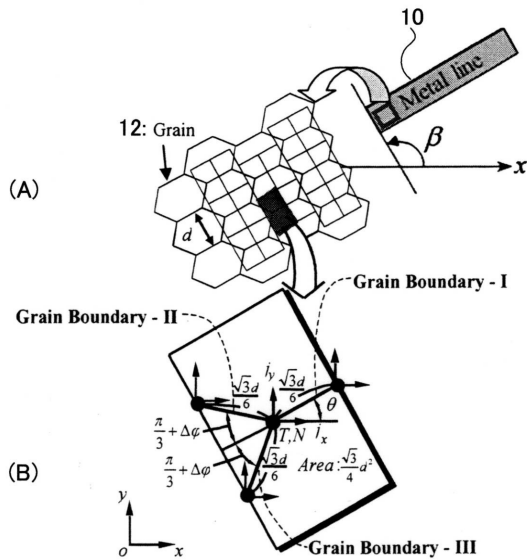
【図2】



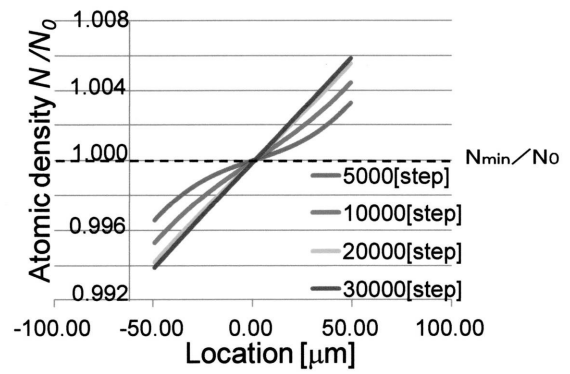
【図8】



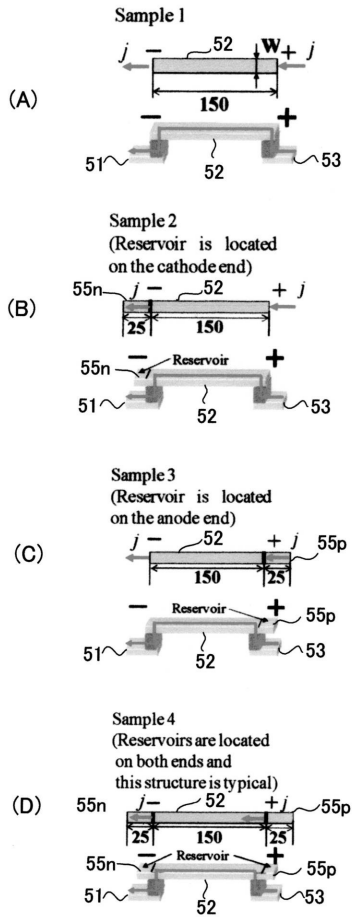
【図1】



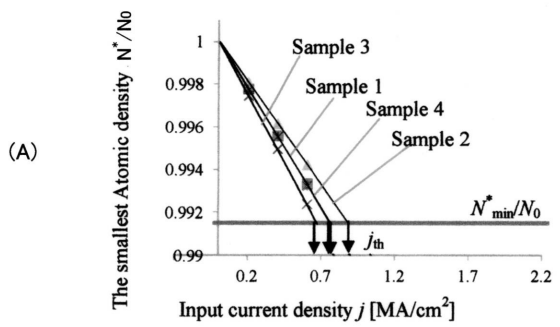
【図3】



【 図 4 】



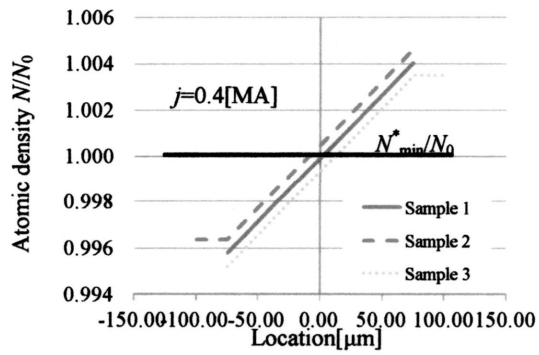
【 図 5 】



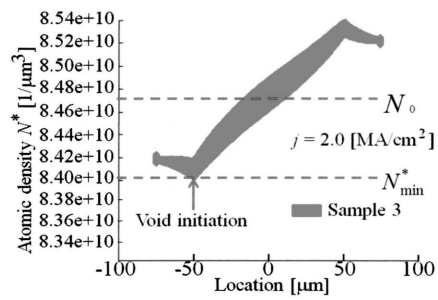
(B)

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

【 図 6 】

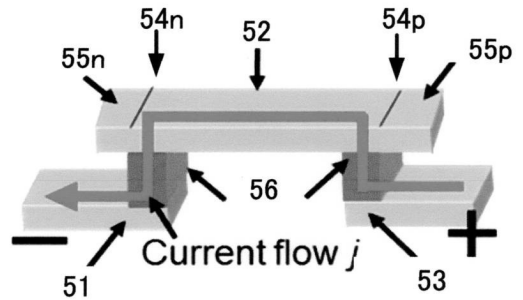


【 図 7 】



【 図 9 】

50



フロントページの続き

(56)参考文献 特開平11-243146(JP,A)
特開2003-347300(JP,A)
特開平11-186433(JP,A)
特開2005-286202(JP,A)
特開2008-028416(JP,A)
特開2000-306969(JP,A)
特開2001-351919(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G06F 17/50
H01L 21/82
IEEE Xplore
Cinii
JSTPlus(JDreamIII)