

原 著 論 文 (5)

Al 薄膜配線の交流および直流抵抗変化と エレクトロマイグレーション[†]

鳳 紘一郎・洪 朝富・東郷 光洋・逸見 次郎

横浜国立大学工学部 〒240 横浜保土ヶ谷区常盤台 156

(1991年3月11日 受理)

Changes in AC and DC Resistance in Aluminum Interconnection under Electromigration Condition

Koichiro HOH, Chao-Fu HONG, Mitsuhiro TOGO and Jiro ITSUMI

Faculty of Engineering, Yokohama National University
156 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240

(Received March 11, 1991) (Accepted April 12, 1991)

Small-signal AC resistance and DC resistance of evaporated pure Al interconnection were measured under the DC current stress which evokes electromigration. AC resistance weakly depends on frequency and increases as the frequency is lowered. This is compared with the fluctuation phenomenon in thin metal films which has been observed in flicker noise studies. Time dependent resistance change can be analyzed by the model of nucleation and growth of the voids in a metal film. Observed drop and preceding oscillation in resistance can be interpreted as the evidence of the condensation of void nuclei and their phase transition into a macroscopic void.

1. 緒 言

集積回路に用いられる金属薄膜配線には 10^6 A/cm^2 オーダーの電流密度の電流が流れる。このとき配線に金属の欠損部（ボイド）が生じて徐々に成長し、ついには断線に至る。また過剰部（ヒルロック）が成長することもあり、配線が隣接していれば短絡故障を引き起こす。これをエレクトロマイグレーション（以下 EM と略す）と呼ぶ。EM の原因は伝導電子の流れが金属原子に衝突して運動量を与え、原子の移動を引き起こすためであると考えられており、実用面でも異種原子（たとえば Al 中の Cu）の添加による抑制策などが講じられてきたり。しかしながら超 LSI への進展につれて配線幅がさらに細くなると、電流密度が増加するだけでなく、金属膜の構造が EM の発生に大きく影響するようになった。そこで EM の発生機構をより詳しく解明し、超 LSI の信

頼性向上のために対策を講じることが重要な課題となっている²⁾。

以上の経緯をふまえてわれわれは、EM の発生を金属中のゆらぎや状態変化との関連でとらえることを目的とし、純 Al 蒸着膜配線において、EM を起こすに十分な密度の直流電流を通じた条件（以下これを電流ストレスと呼ぶ）のもとで直流抵抗および小信号交流抵抗（微分抵抗）を測定して、両者の経時変化ならびに後者の周波数依存性を観測した。

2. 実験方法

2.1 試 料

試料の基板としてはスライド・ガラスおよび表面に厚さ 200 nm の熱酸化膜を成長させた Si ウェーハを用いた。基板表面にレジストを塗布して光リソグラフィで試料パターンを形成してから、純 Al をソースとして抵抗加熱蒸着で Al 薄膜を一面に着け、レジストをリフト・オフして試料の形状を作った。その後 N_2 中で 30 分間

[†] 第 10 回表面科学講演大会（1990 年 12 月 3～5 日）にて発表。

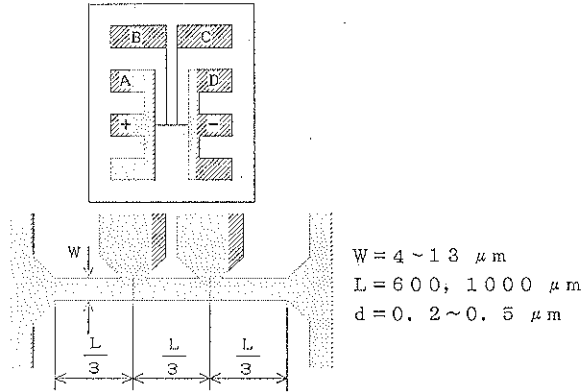


Fig. 1 Sample geometry. Width (W), length (L) and thickness (d) of Al line are shown.

熱処理を行った。処理温度はガラス基板で 350°C 、酸化 Si 基板では 420°C である。Fig. 1 に試料の形状を示す。配線部の線幅は $4\sim 13\mu\text{m}$ 、長さ $0.6\sim 1\text{mm}$ で、両端に電流端子 A, D を設け、中間に電圧端子 B, C を設けて、配線の各部分の抵抗が測定できるようにした。Al の膜厚は $0.2\sim 0.5\mu\text{m}$ である。

2.2 測 定

2.2.1 小信号交流抵抗の測定

Fig. 2 に小信号交流抵抗 r_{ac} の測定回路を示す。電流密度 J_{ac} が $10^6\text{A}/\text{cm}^2$ オーダーの直流ストレス電流 I_{dc} を、端子 A を陽極として端子 D との間に流し、これに重畳させて、交流抵抗を測定するために、 I_{dc} の $1/1000$ 以下の振幅の正弦波電流 i_{ac} を関数発生器から供給し A D 間に流した。いずれの電源回路も、抵抗は試料抵抗の 100 倍以上にして定電流源としている。端子 A~D のうちの 2 つを 1 組の電圧端子として用い、検出された電圧からその端子間の交流抵抗値 r_{ac} を求めた。電圧測定回路の入力抵抗は $10\text{M}\Omega$ とし、また端子 B, C は接地しないで、 I_{dc} が電圧測定回路に分流することを防いだ。周波数 2.5Hz 以上の範囲では検出信号をロックイン増幅器で増幅して測定し、また 2.5Hz 以下の範囲では、検出信号を計算機 PC9801 に GP-IB を介して送り、信号源と同一周波数の正弦波とみなして解析し電圧振幅を求めた。 2.5Hz の点は両方法で測定しており、結果

は一致した。計算機に送るサンプリング間隔は、 $0.1\sim 2.5\text{Hz}$ の範囲では 85ms 、 $0.002\sim 0.1\text{Hz}$ の範囲では 1s である。

いずれの周波数範囲でも、測定中に I_{dc} および $|i_{ac}|$ の変動はないことを確かめている。また、比較のために、 I_{dc} を流さない場合および、試料の代わりにこれと直流抵抗値のほぼ等しい市販のカーボン抵抗をつないだ場合についても、測定を行った。

2.2.2 直流抵抗の測定

直流抵抗 R_{dc} は、 I_{dc} が流れているとき A~D のうちいずれか 2 つの端子間に現れる直流電圧をデジタル・マルチメータで測定して求め、その経時変化を計算機 PC9801 に 100ms の間隔で記録した。直流、交流測定とも室温もしくは、試料槽内をヒーターで昇温させ一定温度に保った状態で行った。温度の設定は最高 145°C である。

3. 実験結果

3.1 小信号交流抵抗の周波数依存性

Fig. 3 にガラス基板上的 Al 配線の r_{ac} の周波数依存性を示す。測定した周波数範囲内で r_{ac} は常に直流抵抗 R_{dc} より大きく、周波数 f の低下につれて緩やかに増大する。 10Hz 以上では $r_{ac}\sim \ln(1/f)$ の依存性に近いが、低周波側ではより緩やかで、測定範囲の低周波端で

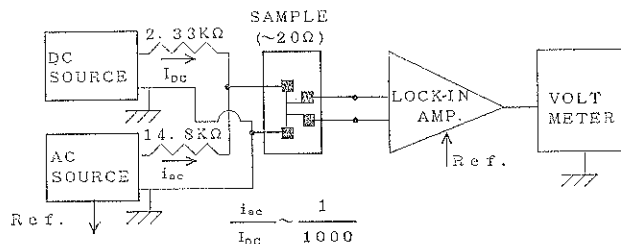


Fig. 2 Circuit for measuring small-signal AC resistance.

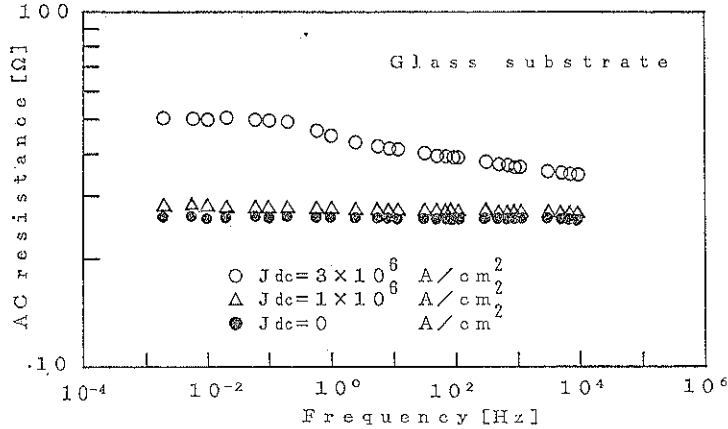


Fig. 3 Frequency dependence of small-signal AC resistance of an Al line on glass substrate. $d=170$ nm, $W=6.5$ μ m, $L=1$ mm, $T=25^\circ$ C

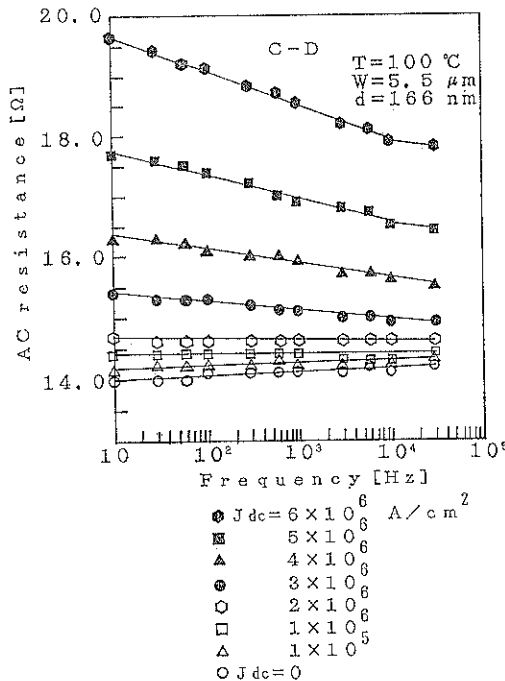


Fig. 4 Change of AC resistance with stress current density. Glass substrate.

は飽和傾向を示す。しかし 10^{-4} Hz までの測定範囲内ではピークを越えて $f \rightarrow 0$ で R_{dc} に近づく様子は現れていない。

この周波数依存性は、 J_{dc} がある程度大きい場合にのみ現れることを Fig. 4 に示す。同図で J_{dc} が 2×10^6 A/cm² 以下のときは周波数依存性が見られず、 r_{ac} は R_{dc} に等しい。また、試料の代わりに抵抗値のほぼ等しいカーボン抵抗をつないで I_{dc} を流した場合にも、 r_{ac} は R_{dc} に等しく、周波数依存性をもたないことが確かめられて

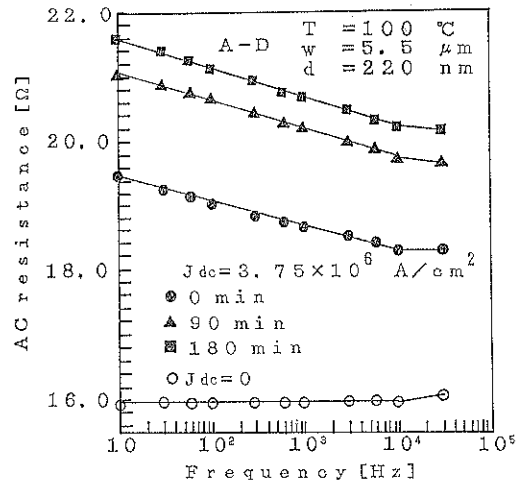


Fig. 5 Change of AC resistance with current stress time. Glass substrate.

いる。したがってこれらの周波数依存性は、測定回路の寄生素子などによるスプリアスなものではなく、EM を引き起こすに十分な密度の電流が Al 配線に流れた場合にのみ生ずる本質的な現象である。Fig. 5 に示すように r_{ac} は I_{dc} を流しているときと時間とともに増大するが、これは 3.2 に述べる経時変化の一端であって、周波数依存性は変わらない。

配線上の場所を、陰極寄り (端子 AB 間)、中央 (BC 間)、陽極寄り (CD 間) に分けて r_{ac} を測定した結果が Fig. 6 である。 $J_{dc}=0$ の場合を基準にした r_{ac} の増大率は、陰極に近いほど大きい。

酸化 Si 基板上の Al 配線においても、Fig. 7 に示すように、 r_{ac} はガラス基板の場合と同様、低周波ほど増大する周波数依存性を示し、 R_{dc} よりも常に大きい。

3.2 交流および直流抵抗の経時変化

直流ストレス電流を流し始めてからの時間経過に伴う直流抵抗 R_{dc} および 1 kHz での小信号交流抵抗 r_{ac} の変化を Fig. 8(a), (b) に示す。同図は後の解析の便宜のために、抵抗値の対数のさらに対数を縦軸にとり、時間の対数を横軸にとってプロットしてある。Al 膜が厚いほど (たとえば 500nm) 交・直流抵抗とも直線によく乗るが、その勾配は陽極寄り (A-B間, 同図(a))と陰極寄り (C-D間, 同図(b))では異なる。酸化 Si 基板の試料についても同様の測定を行った結果が Fig. 9 である。

直流抵抗の経時変化には、抵抗の不連続な低下が見られることがある (以下これを急落と呼ぶ)。Fig. 10 にこれを示す。急落が2回起こっているが、急落後の抵抗上

昇は、急落した時点 (図の白丸) を $t=0$ としてプロットし直すと、同図の挿入図に見られるように、いずれも

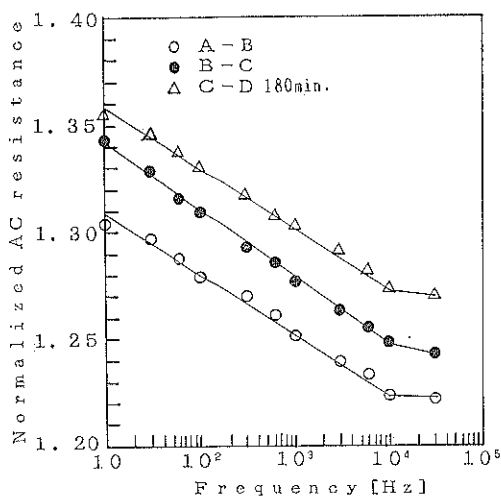


Fig. 6 AC resistance in different parts in an Al line on glass substrate. Resistance is normalized by R_{dc} .

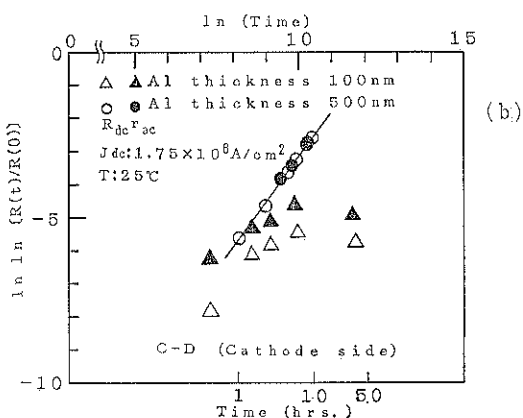
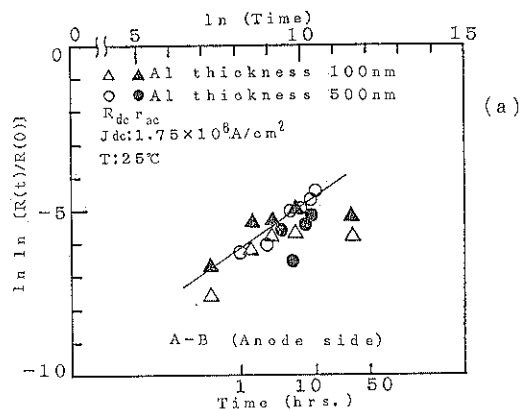


Fig. 8 Change of DC and AC (small-signal) resistance with stress time. Glass substrate. Resistance is measured at (a) anode side and (b) cathode side separately.

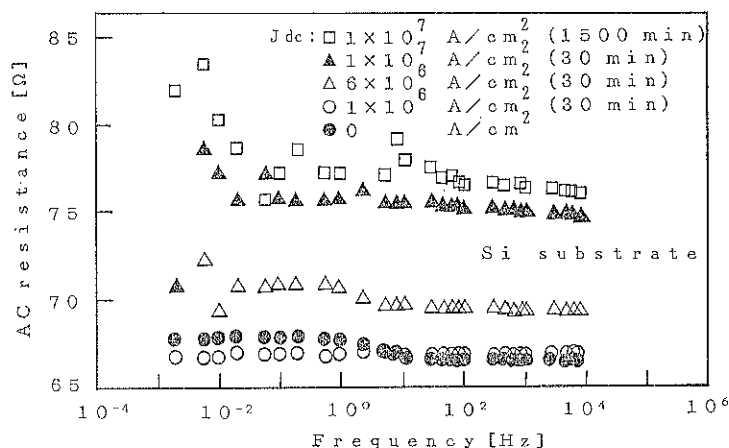


Fig. 7 Small-signal AC resistance of an Al line on an oxidized Si substrate. $d=185$ nm, $W=3.5$ μ m, $L=1$ mm, $T=25^\circ$ C.

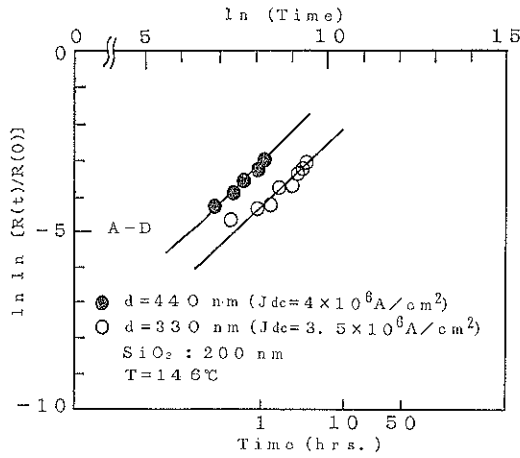


Fig. 9 Change of DC resistance with stress time. Oxidized Si substrate. $W=5 \mu\text{m}$, $L=1 \text{ mm}$.

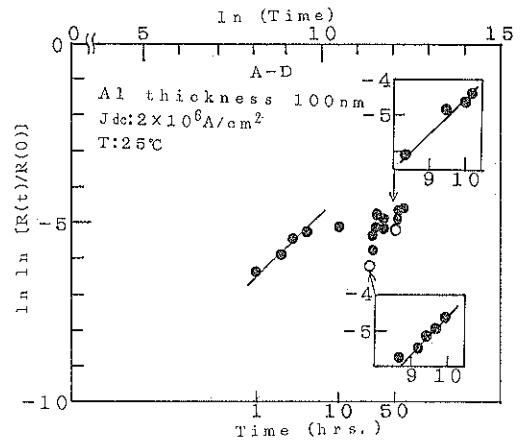


Fig. 10 Resistance drop in $R_{dc}(t)$ plot. Glass substrate. $W=13 \mu\text{m}$, $L=1 \text{ mm}$. Inserted figures show the data replotted by setting each bottom (open circles) as $t=0$.

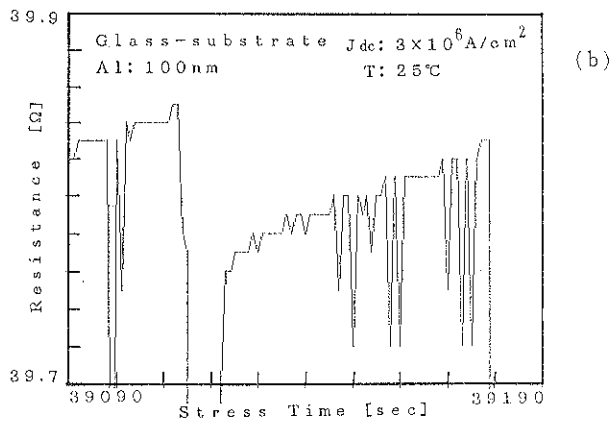
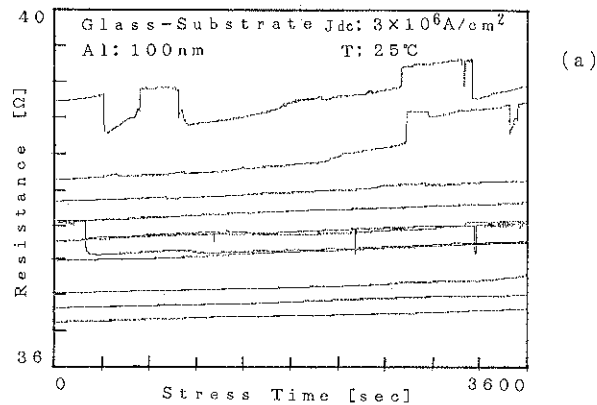


Fig. 11 Long-term change of DC resistance. Glass substrate. $T=25^\circ\text{C}$. Curves in (a) are superposed by limiting horizontal time span in 3600 s. A part of (a) is illustrated in (b) by expanding time scale.

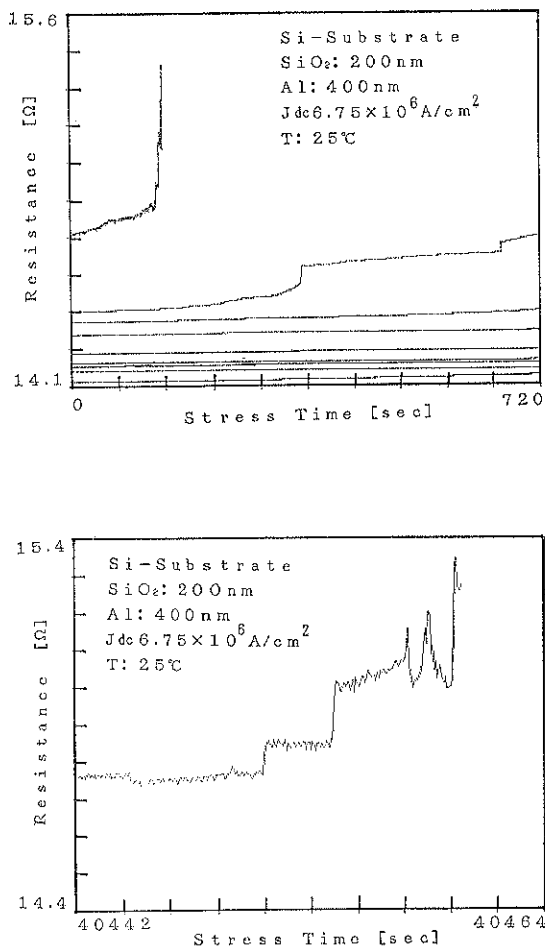


Fig. 12 Long-term change of DC resistance. Oxidized Si substrate. $T=25^{\circ}\text{C}$. (a) is a superposed plot in the same manner as in Fig. 11(a), but only every 10th lines are drawn for 720-36720 s. (b) is an expanded plot.

急落前と同じ勾配の直線に乗っている。

最終的に断線が起こる近くまで、 R_{dc} の経時変化を長時間記録した結果が Fig. 11 と Fig. 12 である。Fig. 11 はガラス基板試料の場合で、同図(a)は 3600 秒を区切りとして測定データを重ねて示した。抵抗の急落のほかに急な増加もあり、また同図(b)に一部を拡大して示したように振動的な変化も見られている。Fig. 12 は酸化 Si 基板の試料における経時変化で、同図(a)では 720 秒を区切りとして重ねて示してある。ただし 720~36720 秒の間は、線が重なるのを避けるために 10 本おき (7200 秒おき) の線だけが図示されている。同図(b)はその一部の拡大である。Fig. 11 と 12 を比べると、酸化 Si 基板のほうがガラス基板より EM が起こりにくい。

4. 考 察

4.1 小信号交流抵抗の周波数依存性

集積回路配線の EM に関して、従来直流通電試験のほかには、実用される信号レベルの交流パルスを印加する実験⁹⁾が行われているのみであって、小信号交流抵抗の測定はわれわれの知る限り例がない。したがってその周波数依存性の観測も本報が最初であり、その機構を説明するモデルは新しく考えなければならない。

ひとつの手がかりになるのは、EM 発生レベルの直流電流を金属配線に通じた場合の雑音スペクトルの研究である。雑音電力スペクトラム $S(f)$ は $S(f) = 4k_B TR(f)$ の関係で $R(f)$ に比例する (k_B はボルツマン定数、 T は絶対温度)¹⁰⁾。しかしこれまで報じられている S の周波数依存性は、いくつかの点でわれわれの結果と異なる。まず多くの報告がフリッカ雑音タイプの $S(f) \sim f^{-1}$ の依存性を示し $k \geq 1$ であるのに対し⁵⁻⁷⁾、われわれの周波数依存性はもっと緩やかである。周波数依存性の緩やかな例としては、Voss と Clarke⁸⁾ が、試料内の温度ゆらぎが抵抗ゆらぎをもたらすとして理論的に導いた $S(f) \sim \ln(1/f)$ がある。われわれの測定結果も Fig. 4~6 に見られるように $10 \sim 10^4$ Hz の範囲では同じ依存性を示すが、Voss と Clarke の理論が低周波側で $S(f) = \text{一定}$ につながるのに対し、われわれの $R(f)$ の結果は Fig. 3 に見られるように、10 Hz 以下でいったん勾配が急になったあと、低周波側で再び緩やかになり、平坦部につながる。この点についてはさらに詳細な検討が必要である。

別の観点から検討しておく必要があるのは、この周波数依存性が Al のみの性質ではなく、基板との界面の現象を含んでいる可能性についてである。ガラス基板と酸化 Si 基板 (Fig. 7) とでは、後者が 10^{-2} Hz 以下でより急な変化を示しているが、後者の測定例がまだ少ないので、両者に本質的な差異があるかどうか断言はできない。しかし、仮に界面の影響が大きいとしても、実際の LSI において金属配線は熱酸化膜、CVD-SiO₂ 層、ガラス膜などに接して存在するので、この実験の工学的意義が薄れるわけではない。

4.2 交流抵抗および直流抵抗の経時変化

EM に際してのボイドの生成に、固溶体における第二相の核発生と成長のモデルを当てはめた Rodbell ら⁹⁾の理論によると、EM による抵抗の経時変化 $R(t)$ は、

$$R(t) = R_0 \exp [-(Bt)^n] \quad (1)$$

で表わされる。Fig. 8(ガラス基板)のプロットで直線に乗っているデータ (Al 膜厚 500 nm) を上式によって解析すると、陰極寄り (CD間) では、 $n=1.4$, $B=4.5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, 陽極寄り (AB間) では $n=0.69$, $B=2.5 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ と求められる。Rodbell らによれば、 $n=1$ は粒界面での、 $n=2$ は粒界の縁での、空孔過飽和状態からのボイド核発生、 $n=2/3$ は転位における拡散律速の成長と析出で説明される。したがって上記の試料では、陰極寄りで $n=1$ および 2 の過程が、陽極寄りで $n=2/3$ の過程が進行していると考えられる。陰極寄りでボイドの発生が顕著なことは、交流抵抗についても Fig. 6 に見られている。また最終的な断線の箇所も陰極寄りである場合が多い。Fig. 9 によれば酸化 Si 基板の試料でも、 $n=1$ の機構で EM が進行している。Al 膜厚 100 nm の場合に (1) 式が必ずしも当てはまらないのは (Fig. 8), 膜が薄いと厚み方向で単一粒界層の構造になることがあるためであろう。

経時変化の中には Fig. 10 のように抵抗の急落が見られることがあるが、同図に示すように、急落の前後とも $n=1$ の過程が進行している。Fig. 11 の長時間観測に現れる急落でも、その前後は $n=1$ の過程である。神宮原ら¹⁰⁾はある程度大きいボイドが発生したとき抵抗がかえって下がることを報告しているが、われわれはこれに加えて、その前後で同一のボイド形成過程が進行していること、ならびに Fig. 11(b) に見られるように、急落の直前に抵抗の振動的変化を伴う場合があることを見出した。これらを合わせると、ここで進行している過程はつぎのように解釈できる。

ボイド核が、その周辺の一定距離内に多くの散乱因子を含んで抵抗を増加させているとすれば、核が凝集してボイドを作ったほうが、散乱領域の体積が減り抵抗は減少する。これが抵抗の急落の原因であり、その直前の振動は核の集合体が凝集して一つのボイドに相転移する際のゆらぎの現れである。一つのボイドが形成されて抵抗が急落した後は、また別の場所で核の凝集が進行するので (1) 式に従って抵抗が増加する。

Fig. 11 と 12 には抵抗のステップ的な増加も見られている。これは上記の過程と違って、巨視的なボイドが一気に形成されて抵抗増加するためであろう。また両図を比べると酸化 Si 基板のほうがボイドが発生しにくい

ようで、Al と基板との界面の影響が大きいと考えられる。

5. 結 言

エレクトロマイグレーション (EM) の機構を探るために、純 Al 蒸着薄膜配線に大きい直流電流を流して、小信号交流抵抗の周波数依存性と直流、および交流抵抗の経時変化の測定を行った。小信号交流抵抗に低周波ほど増大する緩やかな周波数依存性を見だし、金属内の原子レベルのゆらぎとの関連を考察した。抵抗の経時変化では、ボイド核の発生と凝集の相転移を反映すると見られる抵抗変化を観測した。いずれも確定的な結論とするにはなおいくつかの角度から検証を補う必要があるが、たとえば小信号交流抵抗の測定には、ボイド発生以前の初期段階で EM の発生を検知できる非破壊検査法としての可能性もある。本報が EM の機構解明と抑止の研究に多少なりとも寄与できれば幸いである。

おわりに、実験に協力された戸川俊典君に感謝する。

文 献

- 1) F.M. d'Heurle and P.S. Ho: "Thin Films- Interdiffusion and Reactions", ed. by J.M. Poate, K.N. Tu and J.W. Mayer (Wiley, 1978) p. 243.
- 2) H. Okabayashi and K. Nikawa: Proc. 2nd Int. Symp. on ULSI Science and Technology (Electrochem. Soc. 1989) p. 515.
- 3) K. Hatanaka, T. Noguchi and K. Maeguchi: 1989 Symp. on VLSI Technology, Digest of Technical Papers (Business Center for Academic Societies, Japan, 1989) p. 19.
- 4) P. Dutta and P.M. Horn: Rev. Mod. Phys. **53**, 497 (1981).
- 5) R.H. Koch, J.R. Lloyd and J. Cronin: Phys. Rev. Lett. **55**, 2487 (1985).
- 6) B. Neri, A. Diligenti and P.E. Bagnoli: IEEE Trans. Electron Devices **ED-34**, 2317 (1987).
- 7) D.M. Liou, J. Gong and C.C. Chen: Jpn. J. Appl. Phys. **29**, 1283 (1990).
- 8) R.F. Voss and J. Clarke: Phys. Rev. **B13**, 556 (1976).
- 9) K.P. Rodbell, M.V. Rodriguez and J. Ficalora: J. Appl. Phys. **61**, 2844 (1987).
- 10) S. Shingubara, H. Kaneko and M. Saito: J. Appl. Phys. **69**, 207 (1991).