半導体デバイスにおける Al 配線技術の課題と将来動向

大 西 隆*

1. はじめに

半導体デバイスの高集積化は依然として3年4倍のペースで進んでおり、Al配線もすでに本格的サブミクロン時代を迎えた。MOSメモリーを例にとると、64メガビットDRAMで0.3 μm 幅、256メガビットDRAMで0.2 μm 幅前後のAl配線が使われようとしている⁽¹⁾。Al配線の微細化に伴い、これまで顕在化することのなかった様々な事項が問題となってきており、材料面から解決すべき課題も多くある。本稿はこのようなAl配線技術の現状、課題および将来動向をまとめたものであるが、紙数の都合から、Si半導体デバイスと液晶ディスプレイを対象に、材料技術面の課題を中心に解説する。

2. Al配線材料の課題

Al配線を高集積化するための課題は①微細Al配線の信頼性確保、②多層配線における層間接続配線の形成技術の2点に集約される。①は配線自体の微細化に起因するものであり、エレクトロマイグレーション、ストレスマイグレーションが主な課題として挙げられ、材料面からの検討が重要である。②はデバイス構造に絡み、プロセス技術面からの検討が必須の課題である。以下に各課題を紹介する。

(1) エレクトロマイグレーション(EM)

EMは配線中を流れる電子が配線金属原子に衝突して金属原子が移動し、図1に示すような断線故障に至る現象である。EM現象に関しては本報でもすでに包括的な解説がある⁽³⁾⁽⁴⁾。

図1 EMによる断線例(SEM写真)⁽²⁾。

EMは種々の金属において観察されるが、Alは金属原子の中では質量が小さく、EMによる配線故障が重視されており、配線幅が減少していく中において信頼性確保のための最大の課題となっている⁽⁵⁾。

Shereiberによる多結晶Al配線におけるEM機構を図2に示す。EMによるAl原子移動が導体内のすべての位置で均一に生じる場合には、導体全体が一方向に移動するだけで、断線の原因となるボイド、ヒロックは生じない。実際にはAlの原子移動は粒界拡散が支配的であり、その拡散流束が不連続となる点でボイドが発生し、その成長により断線が

* 株式会社神戸製鋼所材料研究所研究員(〒651-22 神戸市西区高塚台1-5-5)

Present Status and Future Technology of Aluminum Conductor Materials for Semiconductor Devices; Takashi Onishi (Materials Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd., Kobe)

Keywords: aluminum conductor, metallization technology, semiconductor, large scale integration, liquid crystal display, electromigration, stress migration, hillock, void, reliability

1994年1月10日受理

図2 多結晶 Al 配線における EM 機構⁽⁶⁾.
機構(1)バルク EM, (2)粒界 EM, (3)グレイン/
バルク EM, (4)欠陥 EM, (5)表面 EM

起こるとされている⁽⁷⁾. また最近では

- (1) ボイドは結晶粒界に沿って成長する⁽⁸⁾
- (2) 粒界 3 重点にボイドができやすい⁽⁹⁾
- (3) 配線に平行な結晶粒界に対して, カソード側にボイド, アノード側にヒロックが形成される⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾

等の事実が明らかになり, 前述のモデルを裏付ける結果が得られている.

このように EM 現象では粒界拡散が支配機構であるが, 配線の微細化により結晶粒径と配線幅が同程度になると, 粒界以外の拡散経路が支配的になることも考慮する必要がある⁽⁵⁾.

ところで EM の評価は実際のデバイス中の配線を簡略化した配線パターンからなる TEG(評価素子)を製作し, 温度, 電流密度等を実使用環境より厳しくした条件下で加速通電試験を行うのが一般的である⁽¹²⁾. 寿命評価には幾つかの判定基準があるが, 断線または抵抗増加率が所定値以上に達したときを故障と判断し, その累積故障率が50%となる時間で評価する MTF が最も広く使用されている⁽¹³⁾⁻⁽¹⁸⁾. その他, 短時間でできる試験法として TRACE 法, ウェハーレベルの試験法として BEM 法, SWEAT 法があるが, いずれも配線寿命予測のための加速試験であり, より正確な予測をするための評価法の研究が現在も続けられている⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾. 正確な配線寿命を予測することは, 配線材料開発の基礎となることから, EM 評価技術の一層の向上を期待したい.

(2) ストレスマイグレーション (SM)

SM は配線に電流を流さなくとも, 423 K 程度の高温に長時間保持するだけでスリット状あるいはくさび状のボイドが生じる現象であり, ボイドが配線を横断した場合図3に示すような断線不良に至る. SM は配線幅が2~3 μm 以下になって初めて顕在化した現象であり, 段差部に多く発生する傾向にある⁽²²⁾⁽²³⁾. SM の駆動力は熱応力を主体とした配線の引張応力であり, SM は本質的に引張応力下での原子拡散現象と考えられている⁽²⁴⁾⁻⁽²⁶⁾(図4参照). しかし SM 現象は EM 現象に比べると未解明な部分が多く, 応力解析シミュレーションを中心に現在も多くの研究がなされている⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾.

図3 SM による断線例(SEM 写真)⁽²¹⁾.

図4 SM によるスリット状断線発生モデル⁽²⁷⁾.

(3) ヒロック

ヒロックは配線表面または側面に発生するサブミクロンサイズの半球状突起物であり, 配線の加熱または冷却により発生する. ヒロック発生理由については様々なメカニズムが提案されているが, 配線が内在する圧縮応力を局部緩和するために起こす塑性変形の一形態であり, 冷却時は主に転位滑り, 加熱時は主に拡散クリープで緩和される⁽³⁰⁾⁻⁽³³⁾. ヒロックは Al, Pb 等の高温クリープ強度の低い低融点金属配線でみられる現象であるが, 配線幅が微細なほど発生しにくくなる. したがって Si 半導体デバイスの Al 配線ではそれ程重要視されていないが, 将来配線間隔が狭くなると, サイドヒロックによる線間ショートが懸念される⁽³⁴⁾.

一方, 液晶ディスプレイの Al 配線では幅 10 μm 前後の広幅配線が使用されており, プロセス中で 673 K 程度の熱履歴を受けることから, 図5に示すようなヒロックの発生が線間ショートを引き起こす深刻な問題になっている⁽³⁶⁾.

(4) その他の課題

その他配線材料自体に係わる重要な課題として, 配線腐食が挙げられる. 従来配線腐食は①パッケージからの水分侵入

図5 ヒロックのSEM観察例⁽³⁵⁾.
(b)ではイオンミリングにより薄膜を削り、断面を観察している).

による腐食⁽³⁷⁾, ②素子の通電による陽極腐食⁽³⁸⁾⁽³⁹⁾, 等素子完成後の信頼性に関わる問題であり, パッシベーション膜や封止剤の改良による対策が取られてきた.

現在では多層配線化, 積層配線化に伴い, ①ドライエッチング後の残留塩素による腐食, ②Al膜と下地膜のガルバニ腐食⁽⁴⁰⁾, 等プロセス中の腐食がクローズアップされている.

また, 多層配線化による層間接続配線に係わる主要な課題として, ①微細接続孔へのAl配線埋め込みと平坦化, ②層間接続配線の低抵抗化, が挙げられる. これらの課題解決に向けて, Al選択CVD, Al高温リフローの研究開発が行われている⁽⁴¹⁾⁽⁴²⁾.

3. 課題解決のための研究開発

Al配線の主要課題であるEM, SM, ヒロックは, 駆動力は異なるものの, いずれもAl原子の移動, 拡散現象であり, 材料に直接関わる課題である. したがってその対策は配線材料の組織制御に尽き, 「合金化」「大粒径化」「高配向化」の観点から対策がなされている. 以下にその現状を紹介する.

(1) 合金化

Si半導体デバイス用Al配線ではAl-1質量%Si-0.5質量%Cu合金が標準的に使用されているが, CuはEM, SM耐性向上の目的で添加されている. 0.5質量%のCu添加により, 純Alの70倍のEM耐性, Al-Si合金の15倍のSM耐性が得られる⁽⁴³⁾(図6参照). Al-Cu合金では金属間化合物 Al_2Cu が粒界析出し, この析出物が粒界でのAl原子の拡散を防止することから, EM耐性が向上すると考えられている⁽⁴³⁾. Al_2Cu の析出挙動については数多くの研究がなされており, Al_2Cu は粒界に沿って矩形状に析出するという報告もある⁽⁴⁴⁾⁽⁴⁵⁾.

Cuに代わる合金元素を添加した配線材料として, Al-1質量%Si-0.3質量%Pd合金が提案されている. 同配線材料はAl-1質量%Si-0.5質量%Cu合金に比較して, 同等のEM耐

図6 Al-Cu系合金配線のEM耐性⁽⁴⁴⁾.

性と図7に示すように2倍のSM耐性を有する. 同配線に723 K-1.8 ks程度の熱処理を施すと, 金属間化合物 Al_4Pd が結晶粒内および粒界に微細析出する. Al_4Pd は Al_2Cu に比較して, 微細かつ析出量が2倍であることがEM耐性向上に寄与していると考えられている⁽⁴⁶⁾⁽⁴⁷⁾.

その他Al原子のマイグレーション耐性向上に有効な合金元素として, Ti, Hf+B, Y, Sc, Mg, Ni等が報告されている⁽⁴⁸⁾-(53). これらの元素はすべて添加により, Alとの金属間化合物を析出することが確認されており, いずれも合金化による「粒界拡散制御」や「析出強化」を狙ったものである.

合金化によるマイグレーション対策は簡便かつ有効な手法であるが, 合金化は配線抵抗を増加させることから, Si半導体デバイス用配線では添加元素の種類, 添加量の制約が大きく, 実用化されているAl合金配線は限られている. これに対して液晶ディスプレイ用配線では配線比抵抗が $1 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ 程度でも使用できることから, 合金設計の自由度が大

図7 Al合金配線のSM耐性⁽⁴⁶⁾.

図8 Ta添加量によるヒロック発生密度の変化⁽³⁵⁾.

図9 加熱による薄膜応力変化の測定結果⁽³⁵⁾.

きい。液晶ディスプレイ用 Al 配線のヒロック耐性向上に有効な合金元素として、Ta が報告されている⁽³⁵⁾。Al-Ta 合金配線は前述の析出強化型合金と異なり、平衡状態で固溶しない Ta をスパッタリングにより非平衡固溶させ、固溶強化による拡散クリープ抑制を狙ったものである。図8に示すように、Al 配線への Ta 添加によりヒロックの発生数は急激に減少し、2 原子%の添加においてヒロックの発生はみられなくなる。図9には加熱時の薄膜の応力変化測定結果を示す。純 Al では約 373 K で降伏するのに対して、Al-Ta 合金では約 623 K まで弾性変形が継続し、膜の耐熱強度が向上している。この高温強度の大幅な強化が、ヒロック耐性向上の主要な原因と考えられている。またこのような Ta をはじめとする遷移元素の添加は Al 配線の耐食性向上にも有効なことが明らかにされている⁽⁵⁴⁾⁻⁽⁵⁷⁾。

(2) 大粒径化(結晶粒径制御)

Al 薄膜の結晶粒径を増大させると、図10に示すように結晶粒界が竹の節状に配線を横断する「バンパー粒界」となる。バンパー粒界を有する配線では、拡散流束が不連続となる粒界3重点が存在せず、また Al 原子の移動モードが粒界拡散モードから粒内拡散モードに変わることから、EM 耐性向上に有効であり、広く利用されている⁽⁵⁸⁾⁻⁽⁶⁰⁾。

図10 配線中の粒界構造モデル。

(3) 高配向化

多結晶 Al 配線の高配向化もマイグレーション耐性向上に有効であり、残留ガスの影響を極力排除した超高真空スパッタやバイアススパッタ等の成膜手法により Al 膜の配向性向上と EM、ヒロック耐性向上が確認されている⁽⁶¹⁾⁻⁽⁶³⁾。

Al 配線の高配向化の究極は単結晶化である。図11に示すように、単結晶 Al 配線の EM 耐性は多結晶 Al 配線と比較して格段に優れており、マイグレーション耐性向上のポテンシャルは極めて高いといえる。単結晶 Al 配線は単結晶基板からのエピタキシャル成長法を用いて実験的に形成され、評価されてきたが、その実用化にあたっては、非晶質絶縁膜上に単結晶 Al 膜を形成するという困難な課題を解決する必要がある。現在このような実用化に向けた研究も活発に行われており、「単結晶埋込み配線形成技術」等が提案されている⁽⁶⁵⁾。

(4) 積層配線

配線材料自体の対策ではないが、マイグレーション耐性向上に有効な手法として積層配線技術が挙げられる。下地膜の使用はもともと基板の Si が Al 配線膜に拡散するのを防止する目的で設けられたものであるが、EM、SM 耐性向上に有効であることから、W、Mo 等の高融点金属や TiN、TiW、MoSi 等を Al 配線の上部または下部に設ける積層配線の使

図11 Al 配線の EM による抵抗変化⁽⁶⁴⁾.

用が常識化している⁽⁶⁶⁾⁻⁽⁶⁹⁾.

EM, SM 現象において, 結晶粒界は Al 原子拡散の経路およびボイドの生成基点となる. したがって積層化により, 結晶粒界が配線の厚み方向に貫通することとを避け, ボイドの配線全体への伝播を防ぐことにより, EM, SM 耐性を向上させることができる.

また積層配線では, 下地膜の最適化による応力制御や高強度膜を上部被膜し Al 配線の塑性変形を機械的に押さえ込むことも可能であることから, ヒロック耐性向上にも有効である⁽⁷⁰⁾.

現在, 特性面から様々な積層材料, 構成が検討されているが, 最適積層構造の指針は示されていない. Al 配線との組合せによっては固相反応や拡散によるコンタクト不良, 断線, 腐食等の問題が新たに生じることもあり, 各層間界面のキャラクタリゼーションを中心とする材料技術面からの検討も重要である.

4. お わ り に

以上, 材料技術の観点から, Al 配線の課題と将来動向を述べた. 将来の微細化に向けた高性能配線技術として, Cu 配線も検討され始めているが, Si 半導体デバイス開発の歴史の中で築き上げられてきた Al 配線技術は今後もその限界まで材料開発が続くと考えられる. 今後の材料開発は「結晶性改善」と「合金元素の探索」の2つの大きな方向に進むことが予想される. このような材料開発を成功させるためには, Al 配線材料の十分な理解と高度な利用技術が今後ますます必要になってくると考える.

文 献

- (1) 菅原活郎: 九州大学機能物質科学研究所報告, **6**(1992), 25.
- (2) F. Fantini *et al.*: Thin Solid Films, **172**(1989), L85.
- (3) 小岩昌宏: 日本金属学会会報, **6**(1967), 159.
- (4) 吉川明静: 日本金属学会会報, **14**(1975), 513.
- (5) M. L. Dreyer *et al.*: Appl. Phys. Lett., **60**(1992), 1860.
- (6) H. U. Schreiber: Solid State Electron., **24**(1981), 583.
- (7) 伊藤隆司, 石川 元, 中村宏昭: VLSI の薄膜技術, 丸善, (1986), 209.
- (8) S. Shingubara *et al.*: J. Appl. Phys., **69**(1991), 207.
- (9) 藤田弘敬ほか: 第52回応用物理学会学術講演会講演予稿集, No. 2, (1991), 677.
- (10) J. E. Sanchez *et al.*: JOE, **42**(1990), 41.
- (11) J. E. Sanchez *et al.*: J. Electron Mater., (1990), 1231.
- (12) 和田哲明: Natl. Tech. Rep., **36**(1990), 493.
- (13) 栗山弘子ほか: 電子情報通信学会技術研究報告, **91**(332)(SDM91 130-139), (1991), 49.
- (14) 渡辺良道ほか: 信頼性, 保全性シンポジウム発表報告文集, **19**(1989), 135.
- (15) 影山麻樹子ほか: 電子情報通信学会技術研究報告, **91**(332)(SDM91 130-139), (1991), 37.
- (16) M. Kageyama *et al.*: Annu. Proc. Reliab. Phys., **29**(1991), 97.
- (17) 中村愛子: 電子情報通信学会技術研究報告, **91**(278)(SDM91 21-28), (1991), 5.
- (18) A. J. Patrinos *et al.*: Thin Solid Films, **196**(1991), 47.
- (19) R. W. Pasco *et al.*: Solid-State Electron., **26**(1983), 445.
- (20) 日本電子部品信頼性センター編: 半導体集積回路におけるエレクトロマイグレーションに関する文献調査成果報告書, (1987), 165.

- (21) C. S. Whitman *et al.*: Morris E. Fine Symposium, (1991), 451.
- (22) 小松周一: アルトピア, **8**(1990), 18.
- (23) 松本千佳ほか: 第52回応用物理学会学術講演会講演予稿集 No. 2, (1991), 677.
- (24) P. A. Finn *et al.*: J. Appl. Phys., **67**(1990), 2927.
- (25) K. Hinode *et al.*: J. Vac. Sci. Technol., **B8**(1990), 495.
- (26) N. Owada *et al.*: 1985 Proc. Second Int'l IEEE VLSI Multilevel Interconnect Conf., (1985), 173.
- (27) N. Owada *et al.*: Proc. IEEE VMIC Conf., (1985), 173.
- (28) H. Niwa *et al.*: J. Appl. Phys., **68**(1990), 328.
- (29) H. Niwa *et al.*: J. Appl. Phys., **68**(1990), 334.
- (30) P. Chaudri: J. Appl. Phys., **45**(1974), 4339.
- (31) S. Aceto *et al.*: Thin Solid Films, **219**(1992), 80.
- (32) F. Ericson *et al.*: J. Vac. Sci. Technol., **B9**(1991), 58.
- (33) 村上正紀: 日本金属学会会報, **29**(1990), 240.
- (34) 村尾平信: 月刊 Semiconductor World, **10**(1991), 171.
- (35) 吉川一男ほか: 日本金属学会会報, **32**(1993), 232.
- (36) 池田光志ほか: フラットパネルディスプレイ'90, 日経 BP 社, (1990), 58.
- (37) 石川雄一ほか: 金属, (1992), 38.
- (38) 杉本眞生: 電気化学, **55**(1987), 586.
- (39) T. Wada *et al.*: J. Electrochem. Soc., **136**(1989), 732.
- (40) N. Hayakawa *et al.*: Symp. on Dry Process, **N-4**(1992), 147.
- (41) 有田隆信: 月刊 Semiconductor World, **10**(1991), 228.
- (42) 菊田邦子ほか: 月刊 Semiconductor World, **10**(1991), 51.
- (43) S. Mamiya *et al.*: Proc. IEEE Int. Reliability Phys., (1985), 15.
- (44) R. Venkatraman *et al.*: J. Electronic Materials, **19**(1990), 1231.
- (45) D. R. Frear *et al.*: Metallurgical Trans. A, **21A**(1990), 2449.
- (46) Y. Koubuchi *et al.*: J. Vac. Sci. Technol. B, **8**(1990), 1232.
- (47) Y. Koubuchi *et al.*: Proc. IEEE VMIC Conf., (1988), 419.
- (48) T. Hosoda *et al.*: Proc. IEEE Int. Reliability Phys., (1989), 202.
- (49) A. J. Learn: J. Electronic Materials, **3**(1974), 137.
- (50) F. M. d'Heurle *et al.*: J. Electronic Materials, **4**(1975), 497.
- (51) Y. K. Lee *et al.*: J. Vac. Sci. Technol. B, **9**(1991), 2542.
- (52) S. Ogawa *et al.*: IEDM Technical Digest, (1991), 277.
- (53) H. Onoda *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **32**(1993), 4934.
- (54) 大西 隆ほか: R&D 神戸製鋼技報, **43**, No. 3 (1993), 31.
- (55) W. C. Moshier *et al.*: J. Electrochem. Soc., **134**(1987), 2677.
- (56) G. S. Frankel *et al.*: J. Electrochem. Soc., **136**(1989), 1243.
- (57) B. A. Show *et al.*: J. Electrochem. Soc., **137**(1990), 1317.
- (58) 伊藤隆司, 石川 元, 中村宏昭: VLSI の薄膜技術, 丸善, (1986), 212.
- (59) E. Arzt *et al.*: J. Mater. Res., **6**(1991), 731.
- (60) 日野出憲治: 日本金属学会会報, **28**(1989), 40.
- (61) T. Ohmi *et al.*: J. Electrochem. Soc., **137**(1990), 1008.
- (62) 清田哲司ほか: 月刊 Semiconductor World, **10**(1991), 136.
- (63) 豊田 聡ほか: 真空, **34**(1991), 212.
- (64) M. Hasemura *et al.*: IEDM Tech. Digests, (1989), 677.
- (65) 和田純一ほか: 東芝レビュー, **48**(1993), 519.
- (66) P. M. Smith *et al.*: J. Vac. Sci. Technol. A, **2**(1984), 220.
- (67) S. Fukada *et al.*: J. Vac. Sci. Technol. B, **11**(1991), 319.
- (68) J. O. Olowolate *et al.*: Appl. Phys. Lett., **62**(1993), 2433.
- (69) M. Suwa *et al.*: J. Vac. Sci. Technol. B, **9**(1991), 1487.
- (70) K. C. Cadien *et al.*: J. Vac. Sci. Technol. B, **2**(1984), 82.

略 号

MOS: metal oxide semiconductor, 金属-酸化膜-半導体.
DRAM: dynamic random access memory, ダイナミックランダムアクセスメモリ.
EM: electromigration, エレクトロマイグレーション.
SM: stress migration, ストレスマイグレーション.
TEG: test element group, 評価素子.
CVD: chemical vapor deposition, 化学蒸着法.