

半導体・センサデバイス分野における表面・界面制御技術

大脇健史，多賀康訓

Surface and Interface Control in Semiconductor Devices and Sensor Devices

Takeshi Ohwaki, Yasunori Taga

1. はじめに

自動車におけるエレクトロニクス化の拡大に伴い、自動車専用開発された数多くの半導体デバイスおよびセンサデバイスが使用されてきており、さらに、自動車の安全向上、快適性向上、低公害化また情報化のため、その数はますます増加する傾向にある^{1,2)}。また、自動車室内外の様々な状態を把握するための新たなセンサの要望も強い。一般用の半導体・センサデバイスと比較すると、自動車用ではその使用条件が厳しく、信頼性確保が強く要求されている。半導体・センサデバイスの信頼性を向上させるため、また、新たなデバイスを開発するためには、デバイス設計技術、プロセス技術および材料技術等の多方面からの技術開発が必須であるが、デバイスの根本まで立ち戻って、それを構成する基である薄膜の表面・界面で起こる現象を把握し、それを制御する技術（表面・界面制御技術）の開発がますます重要になりつつある。これは、デバイスの故障が圧倒的に、表面・界面から生じる場合が多く、その問題点を解決すれば格段に信頼性が向上するからである。また、近年、新しいデバイスとして、表面・界面の物性を利用するものが着目され、ここでもその制御技術が重要視されつつある。

そこで、本稿では、半導体デバイスの研究開発における表面・界面制御技術の世の中の現状を、特にSiLSI (Large Scale Integrated circuit) デバイスを中心に概観する。さらに、自動車関連分野へ適用（車載化）した時の表面・界面制御技術の重要性を述べ、今後の動向について探る。

2. LSIにおける表面界面制御技術

世の中の半導体技術は、著しい進歩を続けており、1995年段階では0.3 μ mルールが実用化されており、研究レベルではさらに0.25-0.1 μ mルールへと微細化、高機能化、高速化が進んでいる³⁾。このようなLSIデバイスは、様々な薄膜を形成したり、加工したりした構成で成り立っており、高度な表面・界面制御技術のいわば集大成である。この技術は、さらに超薄膜化、多層化、平坦化という方向で進んでおり、ますますデバイスを構成する薄膜の表面・界面制御の重要性が高まる一方である。言い換えれば、「表面・界面を制するものが半導体を制する」と言われる程である。そのレベルは、原子・分子レベルにまで達してきており、半導体デバイスの表面や界面の構造および反応の正確な分析・解析技術⁴⁾および、的確な物性制御技術が不可欠となってきている。

ここでは、上記で述べたように微細化、高機能化が進んでいるLSIデバイスに着目し、その中で行われている表面・界面制御技術について概説し、さらに特にデバイスの信頼性向上において重要である、MOS (Metal Oxide Semiconductor) 構造および配線コンタクトにおける表面・界面の制御技術を紹介する。

2. 1 表面・界面の種類から見た表面界面制御技術

シリコンデバイスを作製するためのプロセス技術は、1)シリコン基板技術（基板作製、清浄化）、2)膜形成技術（絶縁膜形成、配線形成、エピタキシャル成長、不純物添加）、3)エッチング加工技

キーワード

半導体，センサ，LSI，表面，界面，制御技術

術から成り立っており，シリコン基板をベースに様々な材料の薄膜を形成また加工する^{5, 6)}。したがって，表面・界面の種類は多く，現在までにその表面・界面で数多くの問題が発生し，それらを防ぐためのさまざまな制御が行われてきている。

Table 1には，その表面・界面の種類別に見た制御技術を示す。Table 1からも分かるように，Si，金属，酸化物（窒化物）の表面・界面において数々の工夫がなされている。これらを順に概観する。基板となるSi表面において，歩留まりの向上ま

Table 1 Surface and interface control technologies in silicon devices.

Surface & interface	Purpose	Surface and interface control technologies	References
Surfaces	(1) High reliability, high yield	Si surface cleaning (removal of metallic contamination, organic contamination and particles)	7 ~ 10)
		Reduction of surface defects	11)
	(2) Preparation of high quality SIMOX substrate		
Oxides surface	(1) Integration and inter-connect structure	Planalization of interlayer	12)
Si / Si	(1) Preparation of high quality direct bonding wafer	Reduction of interface defects and impurities	13 ~ 15)
Si / metal	(1) Si / Al-Si-Cu	Suppression of Si nodule generation, prevention of alloy formation	16 ~ 18)
	(2) Si / Ti	TiSi ₂ (C ₅₄) formation	19 ~ 23)
Si / oxide	(1) Si / SiO ₂	a) Improvement of SiO ₂ thin film properties (high density, interface stress relaxation) b) Formation of smooth interface	24 ~ 26)
	(2) Poly-Si / SiO ₂	a) Impurity control in p-Si, grain size control b) Diffusion barrier against B (silicon oxy-nitride)	27, 28)
	(3) Si / Ta ₂ O ₅	a) Improvement of adhesion b) Structure control of Ta ₂ O ₅ thin film	29)
Metal / metal	(1) Ti / TiN / Al-Si-Cu	a) Improvement of barrier properties b) Electromigration resistance c) Prevention of corrosion	30) 31) 32)
	(2) W / TiN, W / Al	a) Prevention of W film peeling b) Removal of oxide layer	33) 34)
	(3) Cu / TiN	a) Diffusion barrier against Cu b) Improvement of adhesion	35)
Metal / oxide	(1) TEOS, USG, SOG / Al	Roughness control of metal surfaces plasma irradiation, F atom incorporation	36)
	(2) BPSG / Al-Si-Cu	Control of Al-Si-Cu thin film orientation suppression of nodule generation	37)

た信頼性向上を図るため、各種汚染物（パーティクル（粒子）、金属、有機物、酸化膜等）を除去し、超クリーン化する洗浄技術が提案され、さらに進歩しつつある^{7, 8)}。この清浄度は身の回りに比べけた違いのクリーン度が要求されている。例えば、64MDRAM（Dynamic Random Access Memory）では、 0.04μ 程度のパーティクルでも大きな問題となる。基本的な洗浄技術は、RCA洗浄と呼ばれる湿式洗浄で、20年以上も前に確立された。現在では、この洗浄を基本にドライ方式（例えば、UV-オゾン、光ドライ等）^{9, 10)}を組み合わせ、さらに乾燥方法や放置環境まで管理して、清浄度を向上させている。

Si-Si界面においては、シリコンとシリコンの直接接合によって、SOI（Silicon on Insulator）基板を作製し、利用することが注目されている。これは、個々の素子を完全に絶縁分離できるというメリットがあるからである。この直接接合の場合、シリコン表面の平坦度及び清浄度を原子レベルで制御することが、鍵となっている¹³⁻¹⁵⁾。

Siと金属の界面は、コンタクト部として素子の電気的特性を左右する重要な界面であり、多くの研究開発がなされてきており、さらに高度な技術開発も行われている¹⁶⁻²³⁾。この技術については、2.3において紹介する。

Siと酸化物の界面、特にSi/SiO₂界面は、MOS構造の基本であり、2.2でその精密な制御技術を紹介する²⁴⁻²⁸⁾。また、LSIの中でキャパシタとして、高誘電体酸化物が利用されつつあり、シリコンとの界面においても絶縁性向上のためSiO₂膜を形成する等の工夫がなされている²⁹⁾。

金属/金属界面制御技術は、微細化、高信頼化のための配線技術として、必須の技術となっている。つまり、従来のAl配線に代わり実用化されてきた複数の金属膜を積層した配線^{5, 30-32)}、何層も組み合わせた多層配線とそれらを接続するプラグ技術^{33, 34)}、また、新規な低抵抗配線であるCu配線とバリアメタル等³⁵⁾において、金属と金属の界面は電流経路として非常に重要である。これらの配線において、界面におけ

る清浄化、異種金属間の拡散防止、エレクトロマイグレーション防止、密着性向上、腐食防止等の制御技術がポイントとなっている。

金属と酸化物界面の例では、層間絶縁膜の低誘電率化（配線遅延防止）のため、下地金属膜のラフネス、状態制御、またCVD酸化膜の膜質改良等の制御が行われている³⁶⁾。また、絶縁膜上の配線の信頼性を向上させるため、界面の工夫も行われている³⁷⁾。

2.2 ゲート酸化膜の界面制御技術

MOS構造に対し、現在までに高度な表面・界面の制御技術が行われることによって、飛躍的にMOSデバイスは発展してきた（Fig. 1にその模式図を示す）。現在、高機能化、高集積化に伴い、MOSの中で重要な要素であるゲート酸化膜の厚さは数nmまで薄膜化している。この薄膜化に伴い、さらに高い信頼性が要求されている。このゲート酸化膜の信頼性を評価する方法として経時絶縁破壊試験（Time dependent dielectric breakdown, TDDB）^{6, 38)}が確立されている。一般的にも良く知られているが、ゲート酸化膜は、Aモード（初期不良）、Bモード（偶発不良）、Cモード（真性

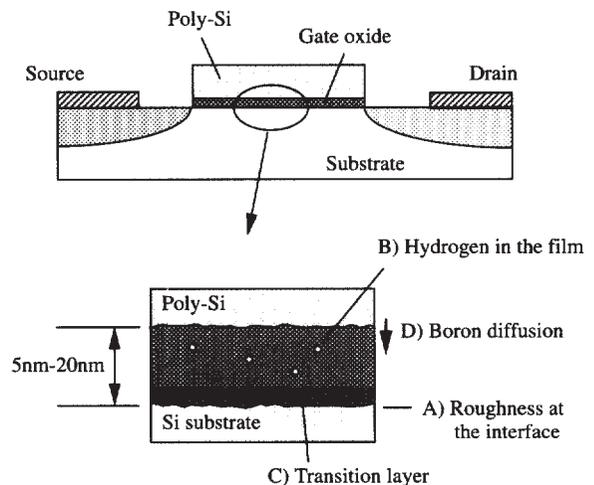


Fig. 1 Typical MOS structure and the subjects for interface control.

不良)と故障を起こしていくが (Fig. 2), 現在ではAモード, Bモードはほとんど発生せず, 薄膜の物性によって決まるCモードの改良レベルにまで達している。これは, ゲート酸化膜の形成時におけるSi表面のNa汚染の完全除去⁶⁾, また, 界面のラフネスを平均自乗粗さとして0.2nm以下するような技術開発が行われてきたためである。SiO₂膜およびSiO₂/Si界面をさらに高品質化するために, 様々なプロセス条件依存性, 電気的特性^{3, 9, 40)}, 物理的な物性^{2, 4, 41)}が調べられている。プロセス条件的には十分把握され, 電気的特性も理解されつつあるが, SiO₂膜物性およびSiO₂/Si界面物性との対応はまだ十分理解されておらず, 現在精力的に研究されている。Fig. 1にも示すように, 着目されている物性は, 界面ラフネス (0.2nm以下のレベル)^{2, 6)}(A), SiO₂膜中の水素 (10¹⁵個/cm³以下)^(B), 界面層2nm付近の構造遷移層中の応力または密度 (C)^{2, 4, 25)}, 上部ポリシリコン電極膜の粒径, 応力, Bの拡散等 (D)^{2, 7, 28)}, である。分析的には極限レベルであり, 分析解析技術の開発から行われている⁴⁾。このような界面物性を制御することによって, MOSデバイスの信頼性向上, また, 微細化による高機能がさらに進んでいくと考えられる。

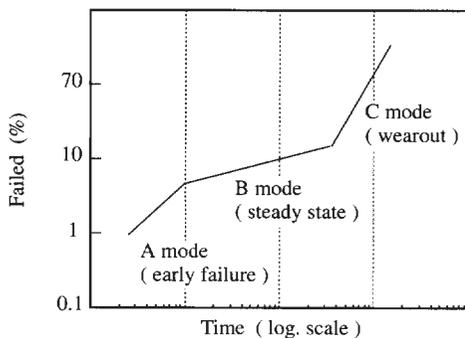


Fig. 2 An example of Weibull plot showing the failure distribution for a MOS device.

2.3 配線コンタクト部の界面制御技術

現在配線材料として用いられているAl合金配線とシリコンの界面 (コンタクト部) において, いままでに問題点となった現象を, Fig. 3の模式図に示す⁶⁾。従来Al配線形成後, 熱処理プロセスが行われているが, その際, SiとAlが合金化反応 (アロイピット形成) を起こし, 拡散接合層を破壊し特性劣化を引き起こす問題点 (A) や, その後常温に戻した時, Al中に溶けていたSiが界面に析出し (Siノジュール)¹⁶⁾, 界面での抵抗が増加する問題点 (B), また, 高密度電流が流れ続けた際, 電子とAl原子との衝突によって原子移動 (エレクトロマイグレーション) を引き起こし断線する問題点 (C)^{18, 19, 42)}, また, デバイスが微細化するにつれ, コンタクト孔にAlが埋まらず, 配線抵抗が増加したり信頼性が落ちるような問題点 (D) が挙げられる。

このような界面現象に対し, さまざまな界面制御がなされてきている。Aの問題点に対しては, 当初Al配線中にあらかじめ1%程度のSiを添加しておき, 合金化反応を防止することが行われてきた。しかしながら, これはBの問題点を促進する結果となった。ミクロンオーダー以上の大きさの素子では, 界面におけるSiノジュール発生は重要

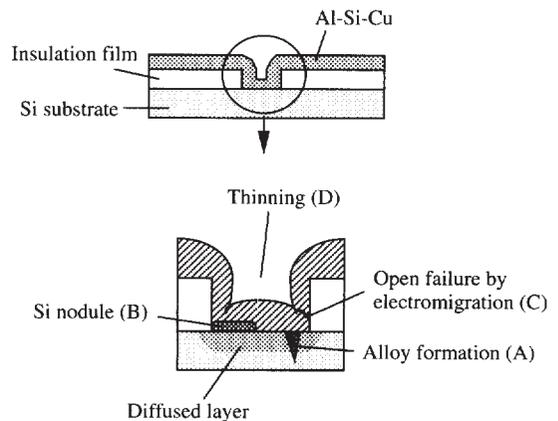


Fig. 3 Problems at the contact.

な問題点ではなかったが、サブミクロン以下では大きな課題となった。また、Cの問題点を解決するため、AlにCuを添加し、Alの拡散を押さえることが行われている。また、Dの問題点もサブミクロン以下では大きな課題となっていた。

現在では、A～Dの問題点をすべて解決する手段として、高融点金属のシリサイドによって、Siと界面を形成し、そのシリサイドとAl合金配線との間にバリア金属（TiN等）膜を形成する積層配線技術^{31, 32)}、またコンタクト部にはWプラグを埋め込み³³⁾、バリアメタルを介してAl配線を形成する技術等が提案されている。これは、シリサイド等によってコンタクト抵抗を下げたり、バリアメタルによってAlの拡散を防止することによって、合金化反応やSiノジュール発生を防止し、さらに高温においてAl膜を形成できるようにし、問題点C、Dを解決している。現在、コンタクト孔が0.1 μ レベルとなってきて、より精密なシリサイド形成技術、埋め込み技術が検討されている。また、MOSデバイスのソース電極やドレイン電極もシリサイドを利用することが検討されており、ここでも、シリサイド/Si界面制御が重要なテーマとなっている。

3. 自動車分野における表面界面制御技術

自動車の環境条件は、温度、振動、衝撃、電磁ノイズ等において非常に厳しく、半導体およびセンサデバイスの高品質維持が大変重要である²⁾。また、自動車の状況を正しく把握し制御するため、さらにいろいろなセンサが望まれている。また、ナビゲーションシステム、自動車電話、車内LAN（local area network）等自動車の情報化が進み、これらの通信のためのデバイスも車載されつつある。このような背景をふまえ、高信頼でかつ低コストである自動車用半導体、センサが研究開発されている。表面界面制御技術は、その高信頼化を支える重要な技術である。そこで、以下、デバイスの高信頼化技術、および、センサにおける表面界面制御技術の役割について考察する。

一般の半導体デバイスを通常使用する場合でも問題となっている、静電破壊、ラッチアップ、ノイズ⁶⁾が、自動車用ではさらに重要な課題である。

これらに対処するために、回路的な対策だけでなく、デバイスを作製する上でも工夫がなされている。例えば、絶縁耐圧を向上させたり、フィルタ膜、拡散防止膜を挿入するようなことも実施されている。特に温度、湿度といった環境条件に対しては、高温においても劣化しない（拡散防止、膜質が変化しない等）⁴³⁾、高湿下でも水分の影響がないようにする（腐食防止、金属の酸化防止等）³⁸⁾技術が開発されている。また、振動に対しては、薄膜の密着力強化²²⁾が実施されている。このように、表面・界面に関連した技術開発が非常に重要となっている。

また、半導体デバイスやセンサを実装する場合においても、封止樹脂とデバイスとの界面、接点や電極取り出し部の界面などにおいて不具合を起こす場合が非常に多く、ここにおいても問題を解決し、電子部品の信頼性を向上させるうえで、表面・界面制御技術は重要な技術である⁴⁴⁾。

自動車には数多くのセンサが使用され、エンジン、エアコンの制御等を行っている⁴⁵⁾。このようなセンサにおいても、自動車用では高信頼であることが強く要求される。また、価格的にも、低コストが望まれる。このようなニーズに対応する意味で、センサの薄膜化、集積化が進行しつつある^{45, 46)}。この薄膜センサ、集積化センサにおいても、センサ材料の薄膜化、またその膜と電極や基板との界面等の制御が重要な技術の一つとなっている^{46, 47)}。また、環境問題から、排気を浄化するため、ガスセンサも自動車用に多く使用されており、さらに、いろいろなガスを検出するためのガスセンサの要望も強い⁴⁵⁾。ガスセンサは、ガスと材料表面との相互作用であり、まさしく表面反応制御がキイであると考えられる。

また、新機能なセンサに向けて、表面・界面からの研究開発も進みつつある^{45, 48-50)}。

4. 今後の方向と課題

自動車の開発トレンドは、上述したように、1) 地球環境保全の立場から低公害化、2) 人に対する要望から安全および快適性向上、3) 世の中の情報化に伴う車の情報化である。これらの目標に向か

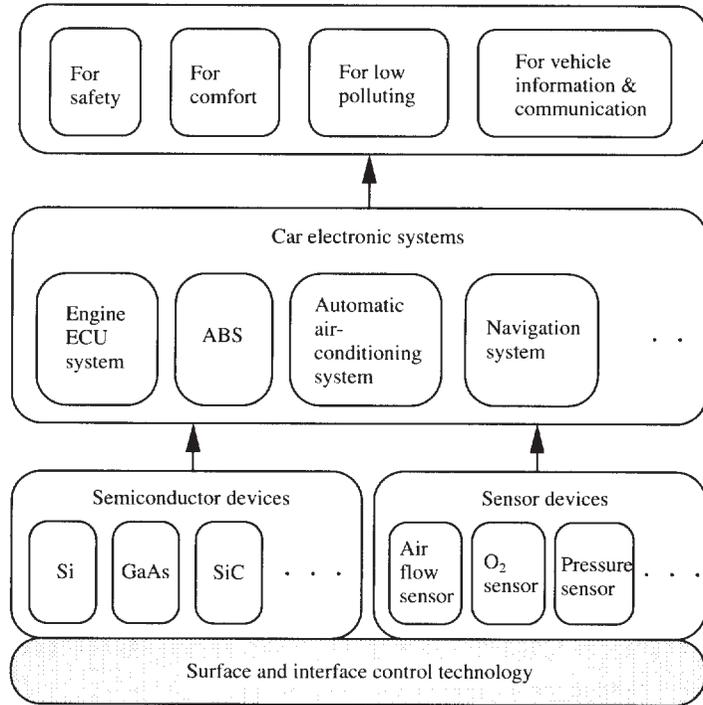


Fig. 4 Situation of the surface and interface control technology
(ECU: Electronic Control Unit, ABS: Antilock Brake System).

って様々なエレクトロニクスシステムが今後も研究開発されていくと考えられる。このエレクトロニクス化の拡大を下支えしているのは、半導体デバイス、センサデバイスである。さらに、これらのデバイスの高信頼化、また新規デバイスの開発をバックアップしている重要な技術のひとつが、表面・界面制御技術である (Fig. 4)。表面・界面制御技術は、自動車の表舞台にはたさないが、今後も、自動車に要求される高信頼および低コスト等を実現するために、見えない部分において大変重要な役割をはたしていくと考えられる。

世の中においても、微細化、高機能化、高速化の半導体デバイスの流れを受けて、表面・界面の制御がますます高度化していくであろう。

今後、上記の様な背景の中、表面や界面の評価解析技術も高度なものが必要とされ、また、さまざまな現象を系統的に把握し、精密に制御しなければならない。評価解析技術では、STMやAFMのような、原子分子レベルでの評価解析、超微量

検出、また、実際に見ることができない界面を直接評価する手段の開発も必要となってくるであろう。また、このような解析に基づいた、表面・界面物性の系統的把握とモデル化は、今後も大きな課題であると考えられる。

5 . おわりに

表面・界面制御技術という観点で、世の中のLSI技術また自動車用半導体デバイス、センサ技術を観た。この技術は、実は非常に広範な分野に関連しており、いわば表面や界面が存在するすべてのものに関係する。さまざまな分野においても同じように、いろいろな表面・界面の解析と制御が行われている。本稿では、その一部である半導体、センサについて垣間見た程度である。今後、ますます高度化していく制御技術において、異分野間における技術を集約していくと、表面・界面制御がさらに容易に、また、系統的に理解されるようになるかもしれない。

参 考 文 献

- 1) 鷲野翔一 : "電装品", 自動車技術, 49-8(1995), 114
- 2) 田淵憲司, 中島三善 : "自動車用半導体の使用環境と信頼性", 自動車技術, 48-8(1994), 44
- 3) Irii, M., Inoue, G. and Asakura, S. : "Semiconductor CIM System ; Innovation Toward the Year 2000", Symp. VLSI Technol., (1995), 1, IEEE
- 4) 村上正紀, 財満鎮明 : "電子デバイス用材料の微小領域分析・計測", までりあ, 34-7(1994), 825
- 5) Sze, S. M. : VLSI Technology, (1988), McGraw-Hill Book company
- 6) 柳井久義 : LSIハンドブック, (1986), 電子通信学会, 811
- 7) Kern, W. and Puotinen, D. A. : "Cleaning Solutions Based Hydrogen on Peroxide for Use in Silicon Semiconductor Technology", RCA Review, 31(1970), 187
- 8) 服部毅 : "超LSIにおけるクリーン化技術", 電子材料, 29-8(1990), 28
- 9) Ishii, M. and Taga, Y. : "Time-of-flight Scattering and Recoiling Spectrometry Study of Plasma-cleaned Silicon Surface", Jpn. J. Appl. Phys., 33-7B(1994), 4186
- 10) 佐藤泰久, 杉野林志, 奥野昌樹, 伊藤隆司 : "ドライクリーニングによるウエハ洗浄", 電子材料, 30-8(1991), 27
- 11) Izumi, K., Doken, M. and Ariyoshi, H. : "CMOS Devices Fabricated on Buried SiO₂ Layers Formed by Oxygen Implantation into Silicon", Electronics Lett., 14(1978), 593
- 12) Nishimoto, Y., Fujino, K., Tokumasu, N., Maeda, K. : "Silicon Dioxide Deposition by Atmospheric Pressure and Low-temperature CVD Using TEOS and Ozone", J. Electrochem. Soc., 137-9(1990), 2883
- 13) Lasky, J. B. : "Wafer Bonding for Silicon-on-insulator Technologies", Appl. Phys. Lett., 48-1(1986), 78
- 14) Shinbo, M., Furukawa, K., Fukuda, K. and Tanzawa, K. : "Silicon-to-silicon Direct Bonding Method", J. Appl. Phys., 60-15(1986), 2987
- 15) 水見啓明, 松井正樹, 藤野誠二, 服部正 : "自然酸化膜を介さないシリコンウエハの直接接合", 信学技報, SDM92-146(1993), 67
- 16) 前田圭一, 田口充, 菅野幸保 : "Al-Si高温スパッタにおけるSiノジュールの挙動", 信学技報, SDM92-101(1992), 45
- 17) Chern, J. G. J., Oldham, W. G. and Cheung, N. : "Electromigration in Al/Si Contacts-induced Open Circuit Failure", IEEE Trans. Electron Devices, ED-33-9(1986), 1256
- 18) Chern, J. G. J., Oldham, W. G. and Cheung, N. : "Contact-electromigration-induced Leakage Failure in Aluminum-silicon to Silicon Contacts", IEEE Trans. Electron Devices, ED-32-7(1985), 1341
- 19) Ma, Z., Xu, Y. and Allen, L. H. : "Nucleation and Growth in the Initial Stage of Metastable Titanium Disilide Formation", J. Appl. Phys., 74-4(1993), 2954
- 20) Naem, M. D., Orr-Arienzo, W. A. and Rapp, J. G. : "Effect of Ti Deposition Temperature on TiSi_x Resistivity", Appl. Phys. Lett., 67-6(1995), 877
- 21) Ishiyama, K., Taga, Y. and Ichimiya, A. : "Reactive Adsorption and Diffusion of Ti on Si(001) by Scanning Tunneling Microscopy", Phys. Rev. B, 51-4(1995), 2380
- 22) Kondo, I., Yoneyama, T., Kondo, K., Takenaka, O. and Kinbara, A. : "Interface Structure and Adhesion of Sputtered Ti Layers on Si: The effect of Heat Treatment", Thin Solid Films, 236-1/2(1993), 236
- 23) Yamauchi, T., Kitamura, H., Wakai, N., Zaima, S., Koide, Y. and Yasuda, Y. : "Photoelectron Spectroscopic Studies on Interfacial Reactions in Zr/2x1(100)Si and Zr/SiO₂/(100)Si Systems", J. Vac. Sci. Technol. A, 11-5(1993), 2619
- 24) Hasegawa, E., Ishitani, A., Akimoto, K., Tsukiji, M. and Ohta, N. : "SiO₂/Si Interface Structures and Reliability Characteristics", J. Electrochem. Soc., 142-1(1995), 273
- 25) Nakanishi, T., Sato, Y., Okuno, M. and Takasaki, K. : "Thin SiO₂ Films in Ozone Atmosphere", Proc. of the 45th Symp. on Semicond. and Integr. Circuits Technol., (1993), 134
- 26) Niwa, M., Udagawa, M., Okada, K., Kouzaki, T. and Sinclair, R. : "Atomic Scale Planarization of SiO₂/Si(001) Interfaces", Appl. Phys. Lett., 63-2(1993), 175
- 27) Shiozawa, J., Kasai, Y., Mikata, Y. and Yamabe, K. : "The Formation of Boron-doped Polycrystalline Si with Extremely Low Resistivities at Low Temperatures", J. Electrochem. Soc., 141-5(1994), 1334
- 28) Hattangady, S. V., Niimi, H. and Lucovsky, G. : "Controlled Nitrogen Incorporation at the Gate Oxide Surface", Appl. Phys. Lett., 66-25(1995), 3495
- 29) Shinriki, H. and Nakata, M. : "UV-O₃ and dry-O₂ Two Step Annealed Chemical Vapor-deposited Ta₂O₅ Films for Strage Dielectrics of 64-Mb DRAM's", IEEE Trans. Electron Devices, ED-38-3(1991), 455
- 30) Kanamori, S. : "Investigation of Reactively Sputtered TiN Films for Diffusion Barriers", Thin Solid Films, 136-2(1986), 195
- 31) Inoue, Y., Tanimoto, S., Tsujimura, K., Yamashita, T., Ibara, Y., Yamashita, Y. and Yoneda, K. : "Behavior of TiN and Ti Barrier Metals in Al-barrier-Al Via Hole Metallization", J. Electrochem. Soc., 141-4(1994), 1056
- 32) Maheo, D. and Poitevin, J. M. : "Structure of TiN Films Deposited on Heated and Negatively Biased Silicon Substrates", Thin Solid Films, 215-1(1992), 8
- 33) Scorzoni, A., Neri, B., Caprile, C. and Tantini, F. : "Electromigration in the Thin-film Interconnection Lines: Models, Methods and Results", Mater. Sci. Reports, 7(1991), 143
- 34) Rana, V. V. S., Taylor, J. A., Holschmandner, L. H. and

- Tsai, N. S. : "Thin Layers of TiN and Al as Glue Layers for Blanket Tungsten Deposition", Tungsten and Other Refract. Met. for VLSI Appl. II, (1987), 187, Mater. Res. Soc.
- 35) Way, S. Q. : "Barriers Against Copper Diffusion into Silicon and Drift through Silicon Dioxide", MRS Bulletin, 8(1994), 30
- 36) Nishimoto, Y., Fujino, K., Tokumasu, N. and Maeda, K. : "Dependence of Deposition Characteristics on Base Materials in TEOS and Ozone CVD at Atmospheric Pressure", J. Electrochem. Soc., 138-2(1991), 550
- 37) 則武千景, 近藤市治, 近藤憲司, 竹中修, 金原榮 : 第56回応用物理学会講演会予稿集, (1995), 490
- 38) 安食恒雄 : 半導体デバイスの信頼性技術, (1988), 日科技連
- 39) 渡辺行彦, 光嶋康一, 只野博 : 第42回応用物理学関係連合講演会予稿集No.2, (1995), 723
- 40) 早川哲生, 渡辺行彦, 船橋博文, 光嶋康一 : 第56回応用物理学会講演会予稿集No.2, (1995), 647
- 41) Helms, C. R. and Deal, B. E. : The Physics and Chemistry of SiO₂ and the Si-SiO₂ Interface 2, (1993), Plenum Press, 503
- 42) Christou, A. : Electromigration and Electronic Device Degradation, (1993), John Wiley & Sons, Inc.
- 43) Fujikawa, H., Noda, K., Ohwaki, T. and Taga, Y. : U.S.Patent5306950
- 44) 多賀康訓, 大脇健史, 山寺秀哉, 種村真幸 : "Ni薄膜用の薄膜電極", 特公平3-49661
- 45) 高橋清, 佐々木昭夫 : アドバンストセンサハンドブック, (1994), 培風館, 763
- 46) Taga, Y. : "Thin Film Sensors for Automobiles", J. Vac. Sci. Technol. A, 13-3(1995), 990
- 47) Yamadera, H. and Taga, Y. : "Cr-O-X Film as a Strain Gauge", Thin Solid Films, 20-6(1991), 107
- 48) Suzuki, M., Taga, Y., Goto, A. and Yasuoka, H. : "X-ray Diffraction and NMR Study on the Structure of Co/Cu Superlattices with Artificially Modified Interfaces", Phys. Rev. B, 50-24(1994), 18580
- 49) 旭良司, 多賀康訓 : 日本物理学会1994年秋の分科会予稿集, (1994), 293
- 50) Tokito, S., Sakata, J. and Taga, Y. : "The Molecular Orientation in Copper Phthalocyanine Thin Films Deposited on Metal Filmsurfaces", Thin Solid Films, 256-1/2(1995), 182

著者紹介



大脇健史 Takeshi Ohwaki

生年：1956年。

所属：薄膜・表面研究室。

分野：薄膜の表面・界面に関する解析的研究。

学会等：応用物理学会，日本化学会会員。工学博士。



多賀康訓 Yasunori Taga

生年：1944年。

所属：デバイス部。

分野：機能薄膜の開発，表面・界面現象の解析。

学会等：応用物理学会，American Vacuum Soc.，Materials Research Soc.会員。工学博士。