自動車用半導体材料技術

水越正人* 竹中 修** 原 邦彦***

1. はじめに

近年、高度に進化した半導体エレクトロニクス技術を用いることにより車の走る・止まる・曲がる・安全・快適性向上などほとんどの分野で必要とする制御機能を有するシステムを作り出すことが可能となってきた。しかし、これらを実際に商品として実用化し、さらに応用の範囲を拡大させることができるか否かは、ひとえに高信頼性かつ低価格でこれを実現できる技術の開発にかかっている。

車載用エレクトロニクス製品は、主に屋外の孤立系で使用されるという点で多くの民生用電子製品とは異なった使用環境条件下におかれる⁽¹⁾。特に、温度・湿度・振動・衝撃などの車載環境は、いずれも半導体エレクトロニクス製品にとっては厳しい条件である。最近の自動車のように多くの制御系が電子化されてくると、自動車の信頼性が半導体デバイスの信頼性で左右されることにもなる。元来、半導体デバイスの大部分は本質的に“界面”の電子物性を利用しており、その意味で車載半導体デバイスの高信頼性化においては半導体/半導体界面のみならず、半導体/絶縁物や金属/半導体など、異なる材料の接合界面の制御が重要な材料技術の一つとなる。

一方、高度電子システムをいかに低価格で実現するかという手段について考えてみる。古くは、個別半導体チップの低価格化がその基本的手段であったが、最近では半導体個別チ

ップの価格上昇を許しても、システム全体として圧倒的な価格低減を実現できるシステム開発を行うという手順に移りつつある⁽²⁾。この場合には電子システムを構成する各種要素機能をすべてオンチップ化できる半導体技術が要求される。究極の姿としてはディスクリット部品のない1チップコントロールユニットが考えられる。この実現のための材料面からみた要素技術としてアナログ回路、パワー素子、センサ素子あるいは論理回路を同一チップ上に混載できる素子間分離・機能集積化技術が必要不可欠である。

本稿では上に述べたような背景をふまえ、自動車エレクトロニクスに用いられる代表的な半導体材料技術について概観する。

2. 機能集積化技術

現在、車載用マイクロコンピュータ、駆動用パワー素子、インターフェイス回路部などの多くはECU(Electronic Control Unit)と呼ばれる金属ケース内のプリント基板上に実装されている。ECUの将来にわたる低価格化、小型化ならびに半田付け部分をなくした高信頼性化をめざして、マイクロコンピュータとパワー素子などの周辺素子群を同一チップ上に形成する技術開発が行われている。

異種回路を同一基板上に形成できる基盤技術の一つとして貼り合わせSOI(Silicon On Insulator)技術がある。ここでSOI技術とは絶縁性基板上に単結晶Siを形成する技術であ

* 日本電装株式会社基礎研究所担当部長(〒470-01 日進市米野木町南山500番1)

** 日本電装株式会社生産技術開発2部部長

*** 日本電装株式会社基礎研究所主席

Semiconductor Materials and Processing for Automotive Electronics; Masahito Mizukoshi*, Osamu Takenaka**, Kunihiro Hara***
(*,**,***Research Laboratories, Nippondenso Co. Ltd., Nisshin. **R & D Department, Production Engineering, Nippondenso Co. Ltd., Nisshin)

Keywords: automotive electronics, pressure sensor, semiconductor processing, thin film, adhesion, silicon on insulator (SOI)

1995年2月13日受理

図1 貼り合わせ界面での結合力発生メカニズム⁽⁵⁾。

る⁽³⁾。pn 接合を利用せず、酸化シリコン等絶縁層による素子間、あるいは機能ブロック間の電氣的絶縁分離が可能になる。最新の SOI 技術については、阿部らによるすぐれた解説⁽⁴⁾があるので、ここでは要点だけを示す。一組のシリコン基板を貼り合わせる場合、あらかじめ親水処理をほどこした鏡面ウェハを貼り合わせ、1273 K 以上の温度で熱処理する。図 1 に Stengl らにより提案された貼り合わせ界面での結合力発生メカニズムを示す⁽⁵⁾。OH 基と水分子に働く水素結合によって結合力が発生し、熱処理による脱水化で強固なシロキサン結合($\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$)に変わる。図 2 に応用例の一つとしてパワーデバイスと論理回路を 1 チップ上に集積化する場合のプロセスフロー図を示す⁽⁶⁾。

絶縁性基板上的 Si 層厚みを極端に薄くした場合、完全空乏型の CMOS デバイスを構成することができる。Manasevit らはこの構造の MOSFET により、バルク単結晶をしのぐ電気特性を実現している⁽⁷⁾。完全空乏型では絶縁層上の Si の厚さは 0.1 μm 以下で、その精度は $\pm 10\%$ 以下が要求される。したがって、この場合高精度で結晶品質を損なわない研磨技術と表面エッチング技術が重要な材料処理技術となる。

3. センサ材料技術

自動車エレクトロニクスシステムには数多くのセンサが用いられているが、ここではその中から半導体物性および加工技術に性能が大きく依存している以下の三つのセンサを取り上げ解説する。

(1) 燃焼圧センサ

自動車の燃費向上、エミッション低減のため、希薄燃焼エンジンが実用化されている。希薄の度合いを高め過ぎると、燃焼が不安定になってドライバビリティが悪化する。そこで直接エンジンのシリンダ内燃焼圧を検出して希薄度合いを制御するシステムが開発された。圧縮力を電気信号に変える素子は、バルク単結晶 Si ピエゾ抵抗素子である。

(1) SOI 領域形成用トレンチエッチ

(2) 砒素イオン注入

(3) 分離溝形成用トレンチエッチ

(4) ウェハ直接接合

(5) 1423 K 酸化

(6) 表面研磨

図2 パワーデバイスと論理回路を 1 チップ上に集積化する場合のプロセスフロー図⁽⁶⁾。

図 3 にピエゾ抵抗素子の概観を示す⁽⁸⁾。ピエゾ抵抗係数の中で π_{63} と呼ばれる係数を利用する。チップ垂直方向に圧縮力が加わると、ホール素子のように電流が流れている向きと直交する方向に起電力を生じる。図 4 に P 型 Si(110) 面上のピエゾ抵抗係数 π_{63} を示す。単結晶 Si のピエゾ抵抗係数の異方性は大きく、したがって $\langle 100 \rangle$ または $\langle 110 \rangle$ 方向に電流

図3 ピエゾ抵抗素子概観⁽⁸⁾.

図4 p 型 Si(110)面上のピエゾ抵抗係数 π_{63} .

を流しても起電力は得られない。ピエゾ抵抗係数とその温度係数は、単結晶 Si 中にドーピングされている不純物の濃度に強く依存する。高濃度になるほど感度は減少するが、同時に感度の温度係数も減少する。単結晶 Si 中の不純物濃度のばらつきは、センサ感度および温度特性のばらつきを生ずるので、Si 単結晶中の不純物濃度の精密制御が極めて重要である。

(2) 加速度センサ

自動車の安全性を高める装置として、エアバッグ、ABS (Antiskid Brake System) が急速に普及している。いずれの装置でもキーとなるセンサは加速度センサである。エアバッグにおいては衝突検出を、ABS においてはタイヤのスリップ率の検出を行っている。加速度検出方式の主流は、高精度、高信頼性、低価格化をめざして、機械式から Si 半導体歪ゲージ式へと移行している。そしてさらなる小型、低価格化をねらい静電容量式加速度センサが開発されている。

図5に Analog Devices 社より発表された周辺回路まで一体化されたセンサチップ写真を示す⁽⁹⁾。このセンサにおいて

図5 静電容量式加速度センサ⁽⁹⁾.

は犠牲層エッチング技術を用いて、基板から $1\mu\text{m}$ 程度浮いたポリシリコン可動電極兼加速度検出用おもりが形成されている。おもりは信号処理回路が形成された Si 集積回路基板に、ポリシリコンの板バネを介してアンカーで取り付けられている。このセンサはチップ表面に平行な加速度を検出できる。加速度によるポリシリコン電極の変位を静電容量の変化として検出する。ポリシリコンはシリコン LSI の製造などに用いられている一般的な半導体プロセスを利用して形成、加工を行う。ポリシリコンは熱膨張率が単結晶 Si 基板とはほぼ等しく、また半導体プロセスと整合性の良い導電体であるためにセンサ検出部に用いられている。多結晶は単結晶に比べて結晶粒径、結晶粒形状などの状態を規定するパラメータが非常に多い。弾性係数・疲労特性などの機械物性と多結晶を規定するパラメータとの相関データが今後急速に積み重ねられて行くものと考えられる。

(3) ナビゲーションシステム

自動車用ナビゲーションシステムは地磁気センサと車速センサを用いた自立航法システムとして登場したが、1990年代に入り、GPS(Global Positioning System)による自車位置検出方式が導入され飛躍的に精度が向上した。近年価格も下がり、普及に加速がかかっている。GPS は複数の人工衛星から放射されている 1GHz 帯の電波を受信し自車と人工衛星の間の距離を計算し、衛星の軌道情報から自車の位置を決定する。

微弱な電波をなるべく小型のアンテナで受信するために、受信アンプの初段増幅素子には超低ノイズの素子が必要となる。FET の雑音はキャリアの移動度が高い程、またゲート長が短い程少なくなる。多くの GPS では GaAs 半導体による HEMT(High Electron Mobility Transistor)を初段増幅素子に用いている。HEMT は超格子構造により変調ドーブ 2 次元電子を形成し、移動度の向上を図っている。ヘテロ界面

図6 T型ゲート HEMT の断面模式図。

が原子オーダーで凹凸を持っていると、この凹凸が作る場の乱れによる電子の散乱が無視できなくなる。したがっていかに原子オーダーで平滑な超格子界面を形成するエピタキシャル成長ができるかが、材料技術の重要な視点である。当初組成の異なる急峻な界面を持つ超格子構造は、その熱的安定性に懸念が示された時期があったが、実用的には十分安定であることが示されている⁽¹⁰⁾。

近年、さらに超低雑音化をはかる T 型ゲート HEMT が実用化されている⁽¹¹⁾。図6に代表的な HEMT の断面構造図を示す。微細な T 型ゲートは、2 層レジストと 2 段階フォトリソグラフィによって形成されたレジストパターンの上にゲート電極金属を真空蒸着し、レジストを除去することにより T 型の電極のみを残すリフトオフ法によって作製する。サブミクロンのゲート長加工は電子ビームを用いる。ヘテロ接合界面にダメージを与えない加工技術、界面欠陥準位の少ないヘテロエピタキシャル成長技術の確立が性能向上に結びついている。

4. 高信頼性化技術

(1) 金属薄膜/半導体の密着性

配線用金属薄膜と半導体との高密着性の確保は、車載用半導体デバイスに求められる高信頼性、高耐久性実現のための必要条件の一つである。

密着性を高めるための指導原理として次の三つの考え方がある。

- (1) イオン照射による蒸着前の半導体基板表面の清浄化。
- (2) 加熱処理による薄膜/半導体界面での混合層の形成。
- (3) 接着層の挿入。

これらの指導原理はどのような系においても常に有効であるとは限らない。久野らはニッケル/シリコン系において熱処理による界面でのシリサイド化反応によって発生する内部応力変化を、その場測定により詳細に調べ、643 K でシリサイドの固相変態に伴う平均原子容の差による大きな塑性変形を観測している⁽¹²⁾。図7はニッケルを蒸着したシリコンウェハの熱処理による曲率を測定した結果である。ニッケルシリサイドにおいては623 K 付近から $\text{Ni}_2\text{Si} \rightarrow \text{NiSi}$ への固相変

図7 Ni シリサイド/Si 系における曲率(1/R)と周囲温度との関係⁽¹²⁾。

図8 Ni/Ti/Si 系における蒸着前表面清浄化処理の違いによる剥離面積率の比較。

態が急速に進む。この時、平均原子容は $(171 \sim 97) \times 10^{-30} \text{ m}^3$ へ減少する。これにともない界面での体積収縮が起り、曲率 $1/R$ が増加する。このような系では界面混合層の形成による密着度が向上しても、界面領域全体としては多数のマイクロクラックの発生が見られ、結果的に密着力は低下することになるため、通常このままの形で用いられることはない。

Kondo らは Ni/Ti 二層膜を例に、アルゴンイオン照射による Ni/Ti 薄膜蒸着前の Si 表面の洗浄処理と膜の密着性との関係について詳しく調べた⁽¹³⁾⁻⁽¹⁵⁾。1%希ふっ酸浸漬による化学的表面清浄化処理と比較して、イオン照射表面清浄化処理をした場合、明らかに密着性が劣ることが確かめられた。図8は蒸着膜の密着性を剥離前の接着部分の面積に対するピールオフテストによって剥離した面積の比により定量化し、それと Ni 薄膜で規格化した内部応力との関係を示したものである。アルゴンイオン照射表面処理されたものは僅かの内部応力で剥離することがわかる。図9に Ti/Si 界面の高分解能電子顕微鏡による格子像を示す。この場合、Ar イオン照射後 Ti を蒸着し、その後の熱処理を加えていない。イ

図9 Ar イオン照射表面処理 Si(100)面と蒸着 Ti 薄膜界面の TEM, 電子線回折(ED)およびエネルギー分散元素スペクトル(EDS). Si 表面上にアモルファス層が形成されている. この層はアモルファス Si 層とアモルファス TiSi 層とから構成されている. またアモルファス Si 層中には残留 Ar が観測される.

オン照射した場合 Ti/Si 界面には形成された二層の界面構造となっている. 非晶質 Si 層の EDX 分析の結果, この層内には Ar が残留することが見出されている.

イオン照射による表面洗浄化を行う場合, 洗浄化と同時に Si 基板内部に Ar 原子の残留する非晶質層が形成される. これが薄膜との密着性を阻害することを示している.

図10は Ti/Si 界面の構造を示す格子像観察結果である. 723 K, 1800 s の熱処理により非晶質シリコン層が消失し, さらに Si-Ti 混合層の厚みも増加している. Ar の分散と同時に Ti-Si の相互拡散が進み密着性が向上している.

(2) エレクトロマイグレーション(EM)/ストレスマイグレーション(SM)

EM とは薄膜配線中を流れる電子と膜を構成する金属原子との衝突による金属原子の移動現象であり, 種々の金属において観測される. この現象は膜中の電流密度が大きくなる程顕著になる傾向を示す. したがって, 半導体デバイスが高集積化され, 結果的に配線の幅が減少するほど断線故障の発生など信頼性上重要な問題となる.

SM とは残留引張応力下にある薄膜を高温に放置することにより起きる金属原子の移動現象である. いずれの場合も, 原子移動は粒界に沿って起きるものが支配的であり, 古くか

ら粒界析出が期待される各種の添加元素について SM および SM に対する抑制効果が調べられている⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾.

(3) 配線金属材料

車載用半導体デバイスに用いられる配線用金属材料としては, 汎用の LSI やディスクリートデバイスにおいて十分実用化実績のあるものを基本に用いるのが一般的である.

今日, 先進安全自動車 ASV (Advanced Safety Vehicle) のコンセプトの実現に向けての努力が各所で精力的に行われているが, このために必要なエレクトロニクスシステムには一層の小型高機能化, 高信頼性の半導体デバイスが要求される. このような場合, 素子の配線抵抗やコンタクト抵抗に起因する論理回路の遅延時間の著しい増加が予想される. 低抵抗金属材料ならびにプロセスの同時開発が行われなければ微細 IC デバイスの機能そのものが成り立たなくなる. さらに微細な配線になるにつれて, これまで問題にならなかったような小さなヒロックなどが起点となって断線に至ることも十分予想される. その意味で, 今後, 平滑で十分低抵抗の微細配線材料の研究開発や低コンタクト抵抗実現のための金属/半導体界面のシリサイド化過程の解明などが, 極めて重要な材料技術となる. このような視点に立ち, 安田, 財満らにより高融点金属/Si 界面の電気的特性と結晶学的構造の先駆的

図10 図9と同一の試料を723 K, 1800 s 熱処理した後の界面でのTEM, ED およびEDS 観察結果. 図9で見られたSi 基板側に存在した残留Ar は完全に消失している.

研究が行われている(18)-(20).

5. お わ り に

半導体材料を「半導体物性を持つ材料」に限定せず, 「半導体デバイスを構成する各種材料」まで拡大解釈し, その上で今日自動車エレクトロニクスを支えている材料技術の中で特に重要と思われる, 機能集積化技術, センサ材料技術ならびに高信頼性化技術について要点を概観した. 今後は, 自動車が安全でかつ自然環境になじむエコロジカルビークル, あるいは動くインテリジェントオフィスとも言える概念をめざして進化して行くものと考えられる. これらの実現には, セラミックスや化合物材料も含め, より一層高度な機能を持った半導体材料が必要になってくるものと思われる.

文 献

(1) 二橋 享ほか: 自動車技術, 48, No. 8 (1994), 40.

- (2) 阿部憲幸: 自動車技術, 48, No. 8 (1994), 27.
- (3) 例えば解説として 日経エレクトロニクス1.27(1956), 108.
- (4) 阿部孝夫ほか: 応用物理, 63(1994), 1080.
- (5) R. Stengl *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., 28(1989), 1735.
- (6) H. Yamaguchi *et al.*: Extended Abstracts of the 1994 International Conference on Solid State Devices and Materials, (1994), 307.
- (7) H. M. Manasevit *et al.*: J. Appl. Phys. 35(1964), 1349.
- (8) 塚田厚志ほか: 豊田中央研究所 R & D レビュー, 28, No. 4 (1993), 49.
- (9) 日経エレクトロニクス11.11(1991), 223.
- (10) K. Hara *et al.*: Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 160(1990), 165.
- (11) 例えば 細木健治ほか: 三菱電機技報, 66, No. 9(1992), 939.
- (12) 久野裕也ほか: 電子情報通信学会 CPM87-109, (1988), 43.
- (13) I. Kondo *et al.*: MRS Symp. Proc., 308(1993), 665.
- (14) I. Kondo *et al.*: Thin Solid Films, 236(1993), 236.
- (15) A. Kinbara *et al.*: J. Adhesion Sci. Technol. 7(1993), 767.
- (16) R. Venkatraman *et al.*: J. Electronic Materials, 19(1990), 1231.
- (17) Y. Koubuchi *et al.*: J. Vac. Sci. Technol. B, 8(1990), 1232.
- (18) S. Zaima *et al.*: J. Appl. Phys., 74(1993), 6703.
- (19) T. Yamauchi *et al.*: J. Vac. Sci. Technol. A, 11(1993), 2619.
- (20) S. Zaima *et al.*: Appl. Surface Sci. 70/71(1993), 624.