半導体センサの高性能接合技術

High Performance Bonding Technology for
Semiconductor Sensor

白水 俊次*

1. ま え が き

LSI チップのような表面形の素子に対し、センサやアクチュエータでは素子に気体や液体の流路から、可動部までも組み込んだ3次元構造を成す場合が多い。立体的な構造に組み上げるには、機能材料間あるいは別の基台材料との間で接合する必要があるがどうしても生じてくる。接合する機能材料は前工程を既に経て、一部の機能素子を作成済みで温度が制限される場合、あるいは基台材料との熱膨張係数が相違する場合など種々さまざまな制約のある場合が多い。接合技術はそれらの要求を満たして形状効果を発揮させるための基盤技術である。

Si など半導体材料の熱膨張係数は、一般の金属に比べて1桁小さい。このため、従来のLSI素子のパッケージにおいても、いかにして基台に固定するかは重要な問題ではあるが、Siの機械的特性と電気的持性を直接使う圧力センサやカンチレバー形の歪みゲージでは、チップ自体に発生する歪みが信号出力である。したがって、センサチップと固定台との接合歪みや接合強度が最大の問題で、目標そのものである。

開発の初期には、ICやLSIチップをパッケージに接着する技術が、そのまま試みられた。たとえば、金メッキしたコパールや金の厚膜をつけたセラミック基板に、金-Siリコン共晶合金化させて接合する方法である。しかし、この方法では共晶反応が全面一様になり難く、接合が均一でなかったり、また共晶がSiチップ中に部分的に食い込み、残留応力が偏在して接合強度が低下する

難点があった。この方法で接合した圧力センサやカンチレバー形歪みゲージでは温度特性が悪く、しかも接合部の破壊強度が弱く、実用上大きな障害となっていた。

このような背景のもとに、半導体センサやアクチュエータの接合一体化、パッケージングなど実装技術の高精度、高信頼性化を目指して次々と新しい技術が開発された。ここではその一つである半導体センサの高性能接合技術について述べる。

2. 高精度接合の種類と特徴

接合の方法は、大別して接着層の有無により分類することができる。少なくとも一方にSiを用いることができる接合の代表的なものをTab.1に示す。

2.1 接着層を介在させる接合

2.1.1 有機接着剤を使う方法

被接合面の凹凸をある程度吸収できる利点があるが、この方法では接着剤の厚さが問題となる。通常、被接合体へ接着剤を塗布するにはスクリーン印刷、スピコートなどの方法がとられるが、いずれの方法も接着剤の厚さの制御には適していない。Siの加工では数 μm 以内の精度が達成されているのに対し、接着剤の塗布厚みをこの精度内に抑えることは困難である。また有機接着剤の耐熱性はその後のプロセスを制限し、完成後も接着剤から徐々にガス放出が残るなど、安定性と信頼性に欠ける。最近では耐熱性の高いポリイミド系を接着剤として使用する試みがなされているが、いぜんとして安定性や信頼性は充分でない。

2.1.2 共晶接合¹⁾

Au-GeもしくはAu-Snなどの合金の薄板をSiウェ

*Shunji Shirouzu
東芝/Toshiba Corp.

Tab.1 Classification of sensor bonding technology.

With bonding layer	Organic bonding material	Si-Si-Glass	Heating and pressure <400°C
	Glass bonding	Si-Glass	Heating and pressure 350~700°C
Bonding layerless	Anodic bonding	Si-Glass Si-SiO ₂	Heating and pressure Electric voltage supply 200~600°C 50~1000V
	Direct bonding	Si-Si Si-Glass Si-SiO ₂	Heating 400~1100°C

ハー間に挟んで加熱することにより、Au と Si の共晶化合物を生成して接合する方法である。被接合物は Si 同士、あるいは Si と Au メッキしたコパールなどの間で行なわれる。比較的低温で接合が可能のため、2.1.1の方法と同様に広く用いられてきた。しかし、接合後のプロセスにおける加熱や完成後の使用温度が高いと Au の Si 中への拡散が進行し、接合強度が損なわれる欠点がある。

2.1.3 ガラス接合²⁾

低融点ガラスを接着層として使用する方法で、強固な接合が可能であり、凹凸もある程度まで許容できる。また機密な接合となるので、Si 圧力センサの固定台への接合などに利用されている。接着剤の低融点ガラスは通常粉体であるため、適当な有機バインダーを加えペーストにしたものをスクリーン印刷法で接着剤に塗布し、加熱溶融して接合する。接合温度は用いるガラスの種類により 350~700°C 程度である。接合層の厚さを必要最小限に制御する方法として、低融点ガラス材料のスパッタが試みられている³⁾。

2.2 接着層を介在させない直接接合

2.2.1 陽極接合^{4~7)}

内部に Na⁺ や H⁺ などの可動イオンを含むガラスと Si を重ね、Fig.1 に示すように、加熱状態にして Si 側が正

の電位となる方向に直流高電界を印加する。一定時間経過後には Fig.2 に示すように、ガラス中のイオンが移動して、Si との界面近傍に空間電荷層を生じ、大きな吸引力で化学結合する。これが陽極接合と呼ばれている。多くのガラスの場合は Na⁺ が、Si 表面の wet 酸化膜の場合は H⁺ が可動イオンとなる。陽極接合は主として Si とガラスの接着に使用されるが、表面に SiO₂ や p-Si を設けたウエハーとガラスにも使用することができる。また、ガラスとガラスに熱膨張係数の近い金属との接合も可能である。接合強度は数 kg/cm² に達するが、被接合物の表面の平滑度に依存し、少なくとも凹凸を 1 μm 以下にす

Fig.1 Configuration of anodic bonding.

Fig.2 The change of electric field strength by the advance of bonding area.

Fig. 3 Silicon direct bonding process.

Fig. 4 The change of bonding strength by thermal treatment.

ることが必要である。接着剤を使用しないため精度が高く、機密な接合が可能であるため、Si 圧力センサをはじめとする多くのセンサ、アクチュエータに応用されている。

2.2.2 直接接合^{8,9)}

Si ウエハー表面の OH 基を利用して、熱処理により接合する方法である。高電界を必要としない利点をもつ。

直接接合のプロセスを Fig. 3 に示す。鏡面研磨し、凹凸を 130 nm 程度に迎えた Si ウエハーを十分に洗浄し、その後、純水に浸漬して表面を親水性にする。次に鏡面同士を貼り合わせる。この段階でウエハー同士は数 kg/cm²程度の接合力を示す。これをさらに空気あるいは N₂-O₂ 中で熱処理することによって強固な接合が得られる。接合強度は熱処理温度に依存し、概ね Fig. 4 に示すように段階的に増加し、1,000°C 以上の熱処理後は結晶 Si そのものの強度と同じになる。親水性にすることにより、表面には OH 基が生成され、ウエハー表面には Si-OH 結合が多数生成する。このようなウエハーの面同士を加重をかけて接触させると OH 間で水素結合が生じ、弱い接合が生まれる。これに熱処理を加えると、まず両ウエハーの Si 原子は Si-O-Si 結合を形成し、酸素を仲立ちとした接合ができる。さらに高温で熱処理すると、Si-O-Si を形成した酸素は Si 中に拡散し両面の Si 原子は Si-Si 結合となって完全な接合となる。Si 同士の接合では、界面の様相は Si 単結晶面方位の組み合わせによって異なる。

Fig. 5 (1)は(100)面接合断面の TEM (透過電
Vol. 8, No. 4

子顕微鏡) 写真である。ずれ角 1°以内ならば結晶格子はつながっており、エピタキシャル同様の連続性が得られる。しかし、転位などの欠陥発生は避けられず、接合面

Fig. 5 TEM photograph of bonded cross sections.

1	Deep impurity layer substitute
2	Epitaxial layer substitute
3	SOI wafer formation
4	Internal processing

Fig.6 Examples of direct bonding application.

Tab.2 The merits and problems of direct bonding.

Merits	Problems
High bonding force at room temp. Extra high bonding force after post heating Chemically stable High temp. heating resistant Post heating is independent on atmosphere	Orientation matching and extra clean surface 900~1000℃ post heating Tendency to growth void at bonding formation Crystal defects in bonded ohmic layer

から 100 nm 近くの幅まで存在する。同じ面方位でも 45° ずれると、界面に欠陥が集中し格子の連続性が失われるが、欠陥の広がりはおかえて少なくなる（同図(2)）。一方、異なった面方位同士、たとえば(100)と(111)などを接合すると、界面には 3 nm 程度のアモルファス層が形成されるが、欠陥の発生は極めて少ない（同図(3)）。Fig.6 に直接接合の基本的な応用法を、また Tab.2 に特

徴をまとめた。

3. 直接接合の応用例

シリコン直接接合を素子の製造プロセスに応用する場合には、当然ながら長所欠点を十分に把握する必要がある。この技術の特徴を Tab.1 にまとめた。センサやマイ

Fig.7 Fabrication process of high voltage MOS FET(1) and its cross section(2).

クロアクチュータでは接着部のオーミック性を用いた例はまだないが、パワー素子では良く検討されている。また SOI 構造素子も、パワー素子の例が多い。そこでこれらを含めて直接接合の応用例を以下に述べる。

シリコン同士を接着してエピタキシャルウエハーと同等の構造とし、それを素子に応用して、1,800 V の高耐圧バイポーラ型 MOS FET が試作された¹⁰⁾。この素子では高不純物濃度の基板の上に高抵抗の活性層を厚く形成させる必要があるため、従来のエピタキシャル技術では実現が困難であった。そのプロセスと素子の断面の略図を Fig. 7 に示した。p 基板に素子形成用の n 型ウエハーを接着しているが、接合界面の欠陥の影響を防ぐために n 基板の接着面にも p⁺層を形成してある。

接着ウエハーの SOI 構造を素子に応用し、フォトダイオードアレイが製造されている¹¹⁾。フォトダイオードを直列に集積すれば高い出力電圧が得られるので、パワー IC の直接駆動が可能になる。しかしながら、素子間分離には誘電体分離が必要になる。Fig. 8 に製造プロセスを示した。酸化膜を介在させて接着したウエハーを用いて上下方向を分離し、横方向は異方性エッチで溝形成し、

Fig. 8 Fabrication process of photodiode array and its cross section.

酸化して絶縁層を形成させる。その後ポリシリコンを堆積させ、表面を研磨して平坦化させる。同様な手法で完全誘電体分離域を形成させ、そこに横型パワー MOS FET を作成した例も報告されている¹²⁾。IC とパワー素子を同一チップ上に形成させた。インテリジェントパワー素子実現への第一歩として位置付けられる。直接接合を各種の半導体センサに応用した例も多い。

シリコンのキャパシタ型圧力センサの、ダイヤフラムの片側に真空の空洞を設け、絶対圧測定ができる圧力センサが試作された¹³⁾。シリコンの蓋を酸素雰囲気中で直接接合する方法で、真空空洞が形成されている (Fig. 9)。共鳴ストレインゲージ型圧力センサのダイヤフラムチップと、支持基体との接合に本法を用いた素子の報告もある。

直接接合によって形成された SOI 構造ウエハーをピエゾ抵抗型圧力センサに応用した例を Fig. 10 に示した¹⁵⁾。抵抗素子の周辺にバイポーラ IC が構成された

Fig. 9 Fabrication process of the cavity type pressure sensor and its cross section.

Fig. 10 Integrated pressure sensor fabricated by bonded SOI substrate.

構造になっている。接着部の SiO_2 層はダイヤフラム形成の際のエッチングのストッパとしての役割と、素子部を基板から電氣的に分離させる役割をもつ。接着 SOI 基板の上にさらに Al_2O_3 層と SiO_2 層をエピタキシャル成長させた多層基板を作り、完全埋め込み型圧力センサが試作された (Fig. 11)¹⁶⁾。この場合も SiO_2 層はダイヤフラム形成のストッパとして使われている。

Fig. 11 Buried type pressure sensor with multilayer SOI.

接着 SOI 基板を用い、液体中のイオン濃度を検出する FET センサが開発された^{17,18)}。センサ素子を基板に対して誘電体分離するために接合基板を用いている。表面にゲート部をもつプローブ型と、裏側にゲートを構成させたりヤゲート型構造が実現された (Fig. 12)。異方性エッチングで基板側に電極取り出し孔を設けた FET センサも発表されている¹⁸⁾。また、アクチュエータへの応用と

Fig. 12 Two type ion sensors with SOI substrate(1) probe type . (2) rear gate type.

しては直接接合の工程を2回使い、静電駆動型のマイクロバルブが試作されている¹⁹⁾。

4. あとがき

従来からセンサの接合については種々の方法が試みられ、改良を重ねてきた。特にSiの各種センサが開発されるにつれて、高精度化がますます求められるようになり、直接接合技術が急速に進んだ。しかし、これらの方法は、目的により各々の特徴を生かして使用されるべきもので、接合法の決定的手法は存在しないといえよう。目的とする素子とそのプロセスに合わせて接合法を選択する必要がある。

接合と密接に関連して解決を要する問題に、フィードスルーの方法がある。接合によって立体的構造や素子部を内部に包み込むキャビティができて、内部からリード線を取り出す技術が必要である。現在のところSiウエハーに拡散で低抵抗リード配線を設ける方法、金属の薄膜リードをガラス接合層を通して取り出す方法等が試みられている。いずれも抵抗値やプロセスとの整合性に難点が残っている。

もう一つの問題は、接合に使える材料がまだ限られていることである。センサやアクチュエータに対する要求が多様化するにつれて、接着する材料の種類も増加する。その要求に接合技術を対応させてゆくためにも、接合のメカニズムの解明が一層必要になろう。

参 考 文 献

- 1) W.H.Ko et al.: "Micromachining and Micropackaging of Transducers", Elsevier(1985)
- 2) M.Matsuo et al.: IEDM Digest of Technical Papers, 816(1984)
- 3) 江刺, 他: 昭和62年電気関係学会東北支部連合大会予稿, 秋田, 36(1987)
- 4) G.Wallis et al.: JAP. 3946(1969)

- 5) L. B. Bousse et al.: Proc. 2nd Int. Meeting on Chemical Sensors, Bordeaux, 449(1986)
- 6) A. D. Brooks: J. Electrochem. Soc., 119(1972)
- 7) I. R. Anthony: JAP. vol. 58, 1240(1985)
- 8) 新保, 他: 応用物理, vol. 58, 373(1987)
- 9) 古川, 他: 第5回結晶工学シンポジウム予稿, 31(1988)
- 10) A. Nakagawa et al.: 1800 V bipolar-mode MOS FETs a first application of silicon wafer direct bonding (SDB) technique to a power device, IEDM Digest of Technical Papers, 5. 6, 122(1986)
- 11) J. Ohura et al.: A directrically isolated photodiode array by silicon-wafer direct bonding, IEEE Electron Device Letters, Vol. EDL-8, 454(1987).
- 12) A. Nakagawa et al.: 500 V lateral double gate bipolar-mode MOS FET (DGIGBT) directrically isolated by silicon wafer direct-bonding (DISDB), Extended Abs. of 20th (1988 International) conf. on solid state devices and materials, Tokyo, A-2-3, 33(1988).
- 13) S. Shoji et al.: Fabrication of implantable capacitive type pressure sensor, TRANSDUCER '87, 305(1987).
- 14) K.Ikeda et al.: Silicon pressure sensor with resonant strain gages built into diaphragm, Proc. of 7th Sens. Sympo. B1-2, 55(1988).
- 15) T. Fujii et al.: Dielectrically isolated silicon diaphragm formation utilizing a wafer bonding method and stress evaluation, Proc. of 9th Sens. Sympo., A2-1, 35(1990).
- 16) G. Chung et al.: High-temperature, high-sensitivity pressure sensor using multi-layer SOI structures, Proc. of 9th Sens. Sympo. A2-2, 39(1990).
- 17) 酒井忠司, 他: SIS (Silicon-Insulator-Silicon) 構造を用いた ISFET, 電気学会電子デバイスセンサ技術合同研究会資料, EDD-88-72, 63(1988).
- 18) T. Sakai et al.: A backside contact ISFET with a silicon-insulator-silicon structure, Sensors and Actuators, Vol. B1, 341(1990).
- 19) M. A. Huff et al.: A pressure-balanced electrostatically-actuated microvalve, IEEE Solid State Sensors and Actuators Workshop, South Carolina, 123(1990).