

多岐にわたる半導体デバイスの製造に貢献する 常温ウェーハ接合装置

Room Temperature Wafer Bonder Applicable to Manufacturing of Semiconductor Devices
in Various Fields



後藤 崇之*1
Takayuki Goto

常温接合技術は、全く熱を加えずに強固な接合が可能であり、近年、常温接合の持つ接合材料の多様性を利用し、多岐にわたるデバイス分野での応用が広がりつつある。

三菱重工工作機械(株)(以下、当社)では、研究用途からデバイス量産に適合する常温ウェーハ接合装置を製造・販売しており、常温接合技術の応用拡大を進めている。

1. はじめに

常温接合技術は、古くからその原理は知られており、東京大学の須賀教授を始めとして精力的な研究が行われてきた⁽¹⁾。その結果、日本のお家芸ともいえる競争力の高い接合技術に成長した。ただし、実際の産業分野で活発に応用され始めたのはごく最近である。

接合材料(ウェーハ)の表面を真空中で活性化して接合する常温接合技術は、全く熱を加えずに強固な接合が可能であり、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)の封止パッケージを中心に応用が進められてきた。しかし近年、常温接合の持つ接合材料の多様性を利用し、SAW(Surface Acoustic Wave)デバイス、発光デバイス、パワーデバイス等、他のデバイス分野での応用が広がりつつある。

当社では、各ウェーハサイズに対応し、研究用途からデバイス量産に適合する常温ウェーハ接合装置を製造・販売しており、常温接合技術の応用拡大を進めている。本装置は、その高品質な接合特性により、各種デバイスの製造に活用されている。本報では、常温接合の原理と特徴、適用分野、接合装置、接合事例について紹介する。

2. 常温接合の原理と特徴

2.1 ウェーハ接合法の分類

ウェーハの接合は、古くから様々なプロセスが用いられてきた。図1に代表的なウェーハの接合法を記載するが、大別すると中間材を介した接合と、直接接合に大別できる。常温接合以外のプロセスは、いずれもウェーハを高温に加熱する必要があり、デバイスへの温度ストレスの低減や熱膨張率差のある材料の低熱歪接合が課題である。

2.2 常温接合の原理

常温接合の原理を図2に示す。通常的环境下では、接合材料表面は酸化膜や吸着層に覆われている。この状態では、室温で接触・加圧しても接合は不可能である。しかし、これらの材料を高真空のチャンバに入れ、Arなどの不活性元素の中性原子やイオンを照射し、接合面上の酸化

*1 三菱重工工作機械(株)技術本部

膜層や吸着層を取り去ると、原子の結合の手(dangling bond)が表面に現れる。この状態の表面はエネルギーの高い状態にあり“活性化された表面”と呼ぶ。このような手段で活性化された表面同士を高真空中で接触させると、dangling bond 同士が結合し強い接合力が生じる。このように、常温接合は、加熱することなしに、全てが室温下で行われるプロセスであり、表面を活性化し接合することから“表面活性化接合”とも呼ばれる。

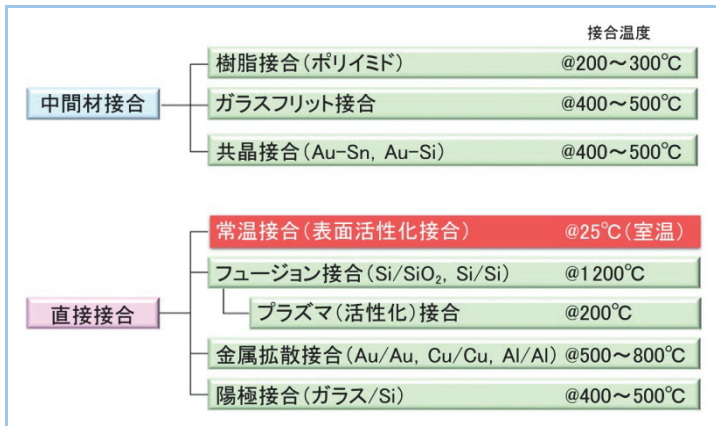


図1 ウェーハ接合法の分類

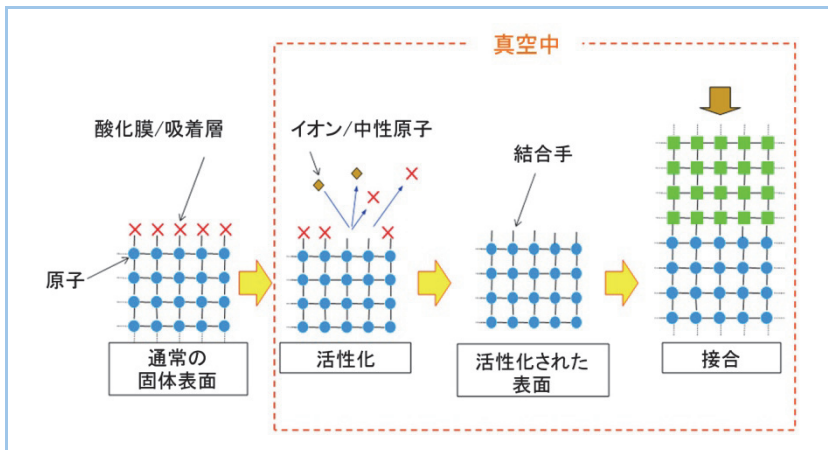


図2 常温接合の原理

真空チャンバの真空度が低い場合、活性化された表面にチャンバ内の残留ガス成分が再吸着し、dangling bondを終端してしまうため、一般に10⁻⁶Pa台の真空度が必要である。また、接合を行うためにはdangling bond 同士が原子レベルまで接近する必要があり、接合界面の面粗さが接合の可否を大きく左右する。具体的には、算術平均面粗さRaで0.5nm~0.7nm以下であることが必要である。また、接合界面に存在するパーティクルは、ボイドの原因となるため、洗浄も十分行う必要がある。

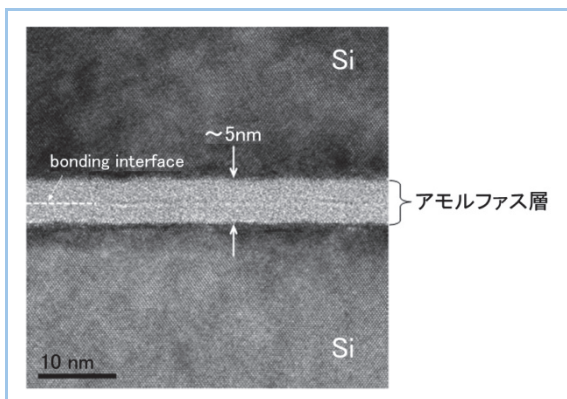


図3 接合界面の透過電子顕微鏡写真

図3に、シリコンとシリコンを接合した場合の接合界面の透過電子顕微鏡写真を示す。同図に示すように、接合界面には厚さ数ナノメートルのアモルファス層が存在する。このような接合界面がアモルファス層になることにより、異なる結晶方位や格子状数を持つ材料同士も接合可能である。

2.3 常温接合の特徴

以上述べた接合原理から、常温接合は次の特徴を持つ。

(1) 室温で母材並みの接合強度が得られる。

材料により、強度の差はあるが、例えばシリコン同士の接合等では、容易に母材並みの接合強度を得ることができる。

(2) 接合による熱歪みが生じない。

室温で接合するため、熱膨張率の大きく異なる材料同士も、熱歪みの影響なく、接合することができる。これにより、適用可能な材料の組み合わせが、大きく拡大する。またデバイスの微細化にも役立つ。

(3) 加熱・冷却が不要であり、高い生産性が得られる。

(4) シリコン系材料、化合物半導体、酸化物、金属など広範にわたる材料の接合が可能である。

また異種材料同士の接合も可能である。

3. 常温接合の応用分野

常温接合は、MEMS 分野を中心に応用が始まった。しかし近年、常温接合が広範な材料を接合できることや、固相の直接接合を室温で実現できることに着目し、応用分野が拡大している。常温接合の応用分野を以下のようなカテゴリーに分類し、それぞれについて解説する。

3.1 MEMS を中心としたウェーハレベルパッケージング

MEMS 構造体が多数形成されたウェーハに封止用のウェーハを接合し、ウェーハレベルで封止パッケージングを行う方式である。

MEMS の製作では、バルクマイクロマシニング⁽²⁾によりウェーハ上に微細な MEMS 構造体を形成する。ウェーハサイズにもよるが、一枚のウェーハで数百から数万のデバイスを形成する。ダイシング後に封止パッケージングを行うが、その際、個片化された個々のデバイス単位でパッケージングを行うのは非効率である。そのため、ウェーハレベルで接合することで一括して封止を行い、その後、ダイシングにより個片化する。この方式は、個片化された個々のデバイス単位でパッケージングを行う方式に比べ、コスト、歩留まりの双方で大きなメリットを持つ。接合時に加熱を行うと、熱応力・熱歪が発生し、歩留まりやデバイス性能低下の原因となるため、常温接合により室温で接合することで、高い歩留まりやデバイス性能の向上を実現できる。ウェーハレベルパッケージングの模式図を図4に示す。主に加速度センサや圧力センサの量産に活用されている。また、ウェーハレベルパッケージングは MEMS のみでなく、水晶デバイスの分野でも広がりつつある。

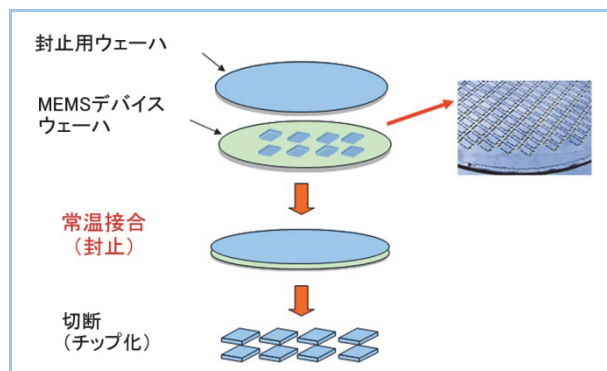


図4 MEMS のウェーハレベルパッケージング

3.2 機能性ウェーハの製造

酸化物や誘電体、光学材料など異種のウェーハを接合することにより、機能性ウェーハを作成し、その後、機能性ウェーハに対しパターニングなどの微細加工を行い、デバイスを製造する。特に室温で接合できることから、熱膨張率差の大きな材料の接合に適している。

図5に示すように、スマートフォン等に搭載されるSAW(表面弾性波)フィルタの製造では、機能基板であるタンタル酸リチウム(LiTaO₃)ウェーハに支持基板であるシリコンやサファイヤウェーハを接合し、その後、パターニングや薄化加工を行い、デバイスを製造している。SAW フィルタは、必要な周波数を通し、不必要なものをフィルタリングするもので、スマートフォン1台あたり数10個が搭載されている。

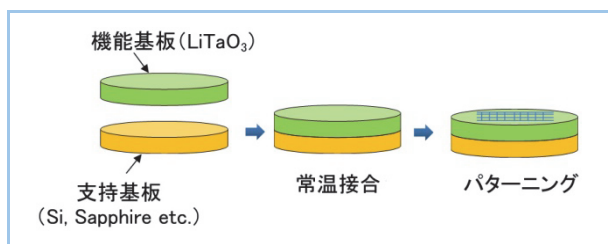


図5 SAWフィルタ用機能性ウェーハの製造例

近年、スマートフォンの多機能化・高機能化により、部品の実装密度が高くなっており、スマートフォン内部の温度上昇が避けられない課題となっている。タンタル酸リチウムは、SAW フィルタの基板として用いられるが、熱膨張率が大きい(16.1ppm/°C)ため、温度上昇に伴う周波数シフトの低減が必要となっている。そこで、タンタル酸リチウムウェーハに、熱膨張率の小さなシリコン(3.4ppm/°C)やサファイヤ(7.7ppm/°C)などのウェーハを支持基板として接合し熱膨張を抑制することでSAWフィルタの周波数温度特性を向上させる方法が考案され、温度補償型SAWフィルタ(TC-SAW: Temperature Compensated-Surface Acoustic Wave)と呼ばれている。

タンタル酸リチウムとシリコンやサファイヤは熱膨張率が大きく異なるため、加熱接合では大きな反りが発生したり、割れが発生するが、常温接合を適用することで高品質な接合が可能である。

3.3 直接接合ができることによる高付加価値デバイスへの応用

例えば半導体材料の直接接合による効率向上や、発熱源と冷却層を直接接合することによる冷却効率の向上などの目的で用いられる。図6は、単結晶SiCやGaN等の機能基板を多結晶SiCやサファイヤ等の支持基板に接合し、スマートカット⁽³⁾により薄膜化して、パワー半導体や発光デバイス用の機能性ウェーハを製造する方法を示している。この方法では、スマートカット後の機能基板を、再度、接合し、これを繰り返すことで、1枚の機能基板から数100枚単位の貼り合せ基板を作製することができるため、製造コストを大幅に低減することができる。

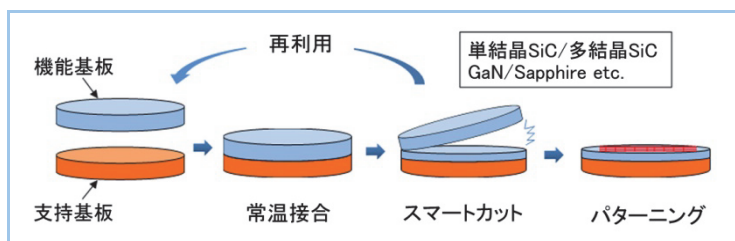


図6 高付加価値デバイス用機能性ウェーハの製造例

4. 常温ウェーハ接合装置

当社では、各種材料のウェーハ径に合わせ、また研究・試作用途からデバイス量産用途まで設備の目的に応じ、各種の常温ウェーハ接合装置をラインアップしている。図7に常温ウェーハ接合装置のラインアップを示す。

ウェーハサイズは、φ 100mm (4インチ)、φ 150mm (6インチ)、φ 200mm (8インチ)、φ 300mm (12インチ)の4種に対応しているが、その他のサイズや標準ウェーハ形状以外のものに対しても対応可能である。



図7 常温ウェーハ接合装置のラインアップ

いずれの装置も、ウェーハ搬送機構、アライメント(接合する2枚のウェーハの位置合せ)機構を内蔵しており、導入後短時間で実生産に使用できる。また、工作機械で培ったデジタルシミュレーション技術を駆使し、精密アライメント(接合後の貼り合わせ精度2μm以下)と接合時の高荷重印加(300mm 対応装置で最大 200kN)の両立、及び、活性化シミュレーションによるウェーハ表面の均一活性化を実現している。これにより、高品質の常温接合を実現することで、量産でも安定した品質で生産が可能である。

デバイス量産用途を目的とした全自動接合装置は、12 セット(24 枚)のウェーハを順次接合する仕様であるが、ウェーハ搬送、アライメント等全ての動作が自動化されている。さらに、各接合バッチそれぞれに個別の接合条件を設定できるため、多品種少量の生産に対しても柔軟に対応できる。研究試作用途、量産用途(200mm ウェーハ対応)の2機種仕様を表1に示す。

表1 常温ウェーハ接合装置の主な仕様

	半自動接合装置 (研究試作, 小・中量生産用)	全自動接合装置 (量産用: 200mm 対応)
型式	MWB-04/06R	MWB-04/06/08AX
処理単位	1セット	12 セット(最大)
ウェーハサイズ	100mm/150mm	100mm/150mm/200mm
運転形態	半自動	全自動/半自動
貼り合せ精度	±2 μm	±2 μm
圧接機構	最大印加荷重 20kN	最大印加荷重 100kN
アライメント方式	赤外線透過・反射方式	赤外線透過・反射方式

4.1 研究試作用接合装置

装置は、上下2枚のウェーハをセットするロードロックチャンバと接合を行うプロセスチャンバから成る。接合対象のウェーハ2枚は、ロードロックチャンバ内にあるステーションにトレイに載せた状態でセットされる。

大まかな接合のフローは以下の通りである。

- (1) 上ウェーハをプロセスチャンバに搬送し、静電チャックにより吸着する。
- (2) 下ウェーハをプロセスチャンバに搬送する。
- (3) Ar ビームを照射し接合面を活性化する。
- (4) ウェーハ上に形成された左右2箇所のアライメントマークによりアライメントを行う。
- (5) 接合する。
- (6) 接合済みウェーハをロードロックチャンバに返却する。

これらの動作は、全て PC の画面にフローや装置状態とともに表示され、オペレータは、フローを確認し、画面のボタンをクリックするだけで作業が進行する。手間のかかるアライメントも画像処理システムがサポートし、短時間で完了することができる。また、Ar ビームの照射条件やその他の接合条件は、レシピとして指定された条件と実際に計測された条件の双方がプロセスログとして保存され、市販ソフトによる解析もできる。

4.2 量産用接合装置

研究試作用接合装置が1バッチ(1接合)単位にロードロックチャンバを開放し段取りを行うのに対し、上ウェーハ 12 枚、下ウェーハ 12 枚をそれぞれのウェーハカセットに格納し、ウェーハの搬送、アライメント、表面活性化、接合の動作を全て全自動で行う装置である。12 バッチ分の接合を1度の真空排気で行うため、1バッチ当たりのサイクルタイムを削減できる。各バッチの接合条件は、それぞれ個別のレシピとして登録できるため、異部品のウェーハを混在させることも可能であり、多品種少量の生産にもフレキシブルに対応できる。

5. 接合事例

5.1 シリコンの接合

シリコンとシリコンを接合し、引張試験を行った結果を図8の写真に示す。引張試験では、接合サンプルを引張試験用治具に接着剤で貼り付けるが、常温接合の接合強度よりも接着剤の接合強度のほうが小さいため、引張試験を行うと接合界面からは剥離せずにサンプルと治具の間の接着剤からはがれてしまう。そこで、図8に示すように、メサ形状(台形状)のサンプルを作成し、常温接合の接合部から優先的に破壊するようにして引張試験を実施した。その結果、写真に示すように接合界面ではなく母材から破壊が生じており、母材並みの接合強度を有していることが分かる。

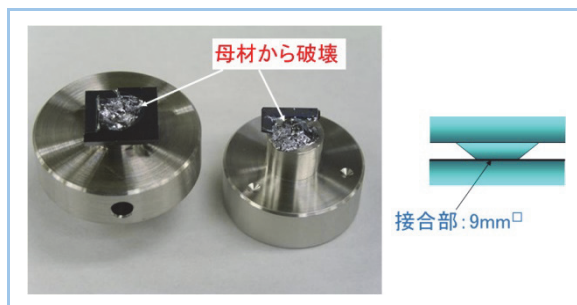


図8 シリコン同士の接合事例(引張試験後)

5.2 金属の接合

図9はシリコン基板上に形成された Au 膜同士を接合し、引張り試験を行ったものである。前述のシリコンの場合と同様に、メサ形状のサンプルを接合したものであり、Au と Au の接合界面ではなく母材であるシリコンから破壊が生じていることが分かる。

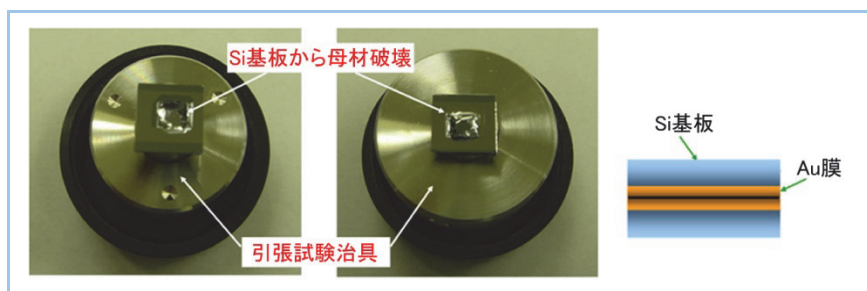


図9 Au 膜同士の接合事例(引張試験後)

図 10 は同じくメサ形状のシリコン基板上に成膜された Cu 膜同士を接合し、引張試験を行った結果である。Cu 膜同士の接合強度よりも、シリコン基板と Cu 膜の密着性を上げるために成膜している SiO₂ 膜と Ti 膜の密着強度の方が小さいため、剥離は SiO₂ 膜と Ti 膜の界面から生じている。この時に測定された SiO₂ 膜と Ti 膜の密着強度は 8MPa であり、少なくとも、Cu 同士の接合強度は、これ以上であることが分かる。

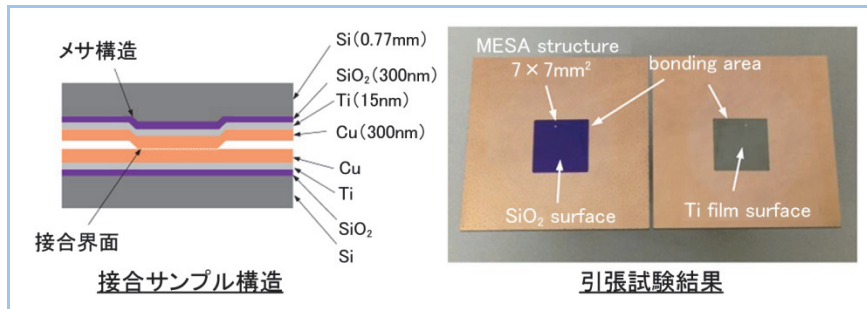


図 10 Cu 膜同士の接合事例(引張試験後)

また、図 11 に示すように Cu 電極を有するウェーハ同士を接合した場合、界面での電気特性が問題となる。そこで、Cu 膜同士を接合後に電気特性 (I-V 特性) を測定した結果を図 12 に示す。この結果から接合界面における電気抵抗は 20mΩ 以下であり、良好な電気特性が得られていることが分かる。

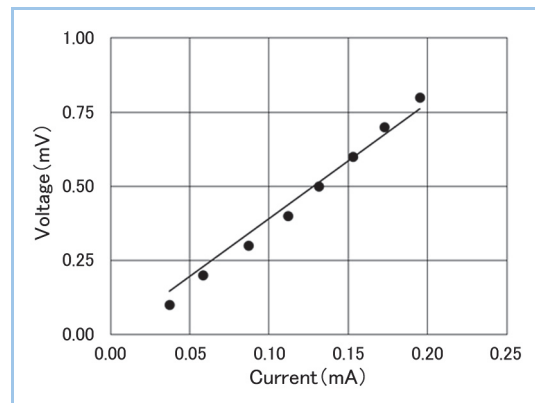
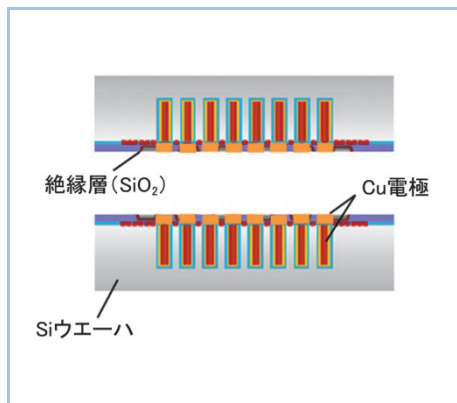


図 11 Cu 電極を有するウェーハ同士の接合

図 12 Cu 接合界面の電気特性

6. おわりに

常温接合は、室温で広範にわたる材料同士を直接強固に接合できる特徴ある接合技術であり、ウェーハレベルパッケージングのみならず、機能性ウェーハの製造や高付加価値デバイスへの適用により、お客様の製品付加価値の向上に貢献でき、今後さらにその適用分野が拡大していくことが期待される。また、当社の常温ウェーハ接合装置は、MEMS や SAW フィルタなどの分野で数多くの納入実績があり、量産に使用されている。今後も多岐にわたる半導体デバイスの製造に貢献していきたい。

参考文献

- (1) T.Suga et al, Direct bonding of ceramics and metal by means of a surface activation method in ultrahigh vacuum, MRS International Meeting on Advanced Material Research Soc., Vol.8 (1989) p.257
- (2) (一財) マイクロマシンセンター, MEMS 読本, (2017)
<http://www.mmc.or.jp/info/cafe/talk/ibbeans/beans21.html>
- (3) 佐藤淳一, 図解入門よくわかる最新半導体ナノプロセスの基本と仕組み, 秀和システム, (2012), p.54