

樹脂と近赤外線を用いた
局所的な仮固定による
高精度基板貼り合せ技術に
関する研究

2018 年 1 月

学生番号 D12T2105Y

近藤 正大

目次

第1章	序論	1
1.1	研究の現状	1
1.2	論文の目的と論文の構成	8
第2章	ウェーハ接合技術	11
2.1	序言	11
2.2	直接接合	12
2.3	陽極接合	15
2.4	共晶接合	16
2.5	拡散接合	18
2.6	熱可塑性樹脂	20
2.7	熱硬化性樹脂	24
2.8	ガラスフリット接合	26
2.9	レーザーボンディング	27
2.10	結言	28
第3章	ウェーハのずれとアライメント	30
3.1	序言 既存接合技術とウェーハのずれ	30
3.2	アライメントの重要性	31
3.3	接合装置によるずれ抑制のアプローチ	33
3.4	薄膜アルミパターンによるずれの防止	34
3.5	結言	36
第4章	近赤外線を用いた局所的な仮固定	40
4.1	樹脂（ポリイミド）を使った接合プロセス	40
4.2	近赤外線による局所的仮固定	42
4.3	局所的な仮固定の方法	45
4.4	実験機系	50

4.5	アライメント精度の検証（ポリイミド）	53
4.6	アライメント精度の検証（BCB, SU-8）	59
4.6.1	BCB	59
4.6.2	SU-8	59
4.7	商業ベースの装置開発	63
第5章	接合したデバイスの引張り試験	65
5.1	接合強度の確認方法	65
5.2	試験サンプルの準備	66
5.3	試験方法と条件	67
5.4	強度試験の結果	69
第6章	デバイスへの応用	71
6.1	マイクロ流体デバイスの試作	71
6.2	デバイス製造工程	71
6.3	結果と検討	73
第7章	結論	76
7.1	結論	76
7.2	今後の課題	77

第1章 序論

1.1 研究の現状

スマートフォンに代表される携帯電子端末が爆発的に普及しており、常にその小型化・軽量化が市場から求められている。特にスマートフォンにおいては高速 CPU による処理速度の向上と相まって数多くの機能とソフトウェアによる拡張性を有することで、いわゆる電話とは外観も含めて全く異なる携帯機器となった。図 1.1 は図 1.1 2012～2016 年におけるスマートフォン普及の推移を示している。

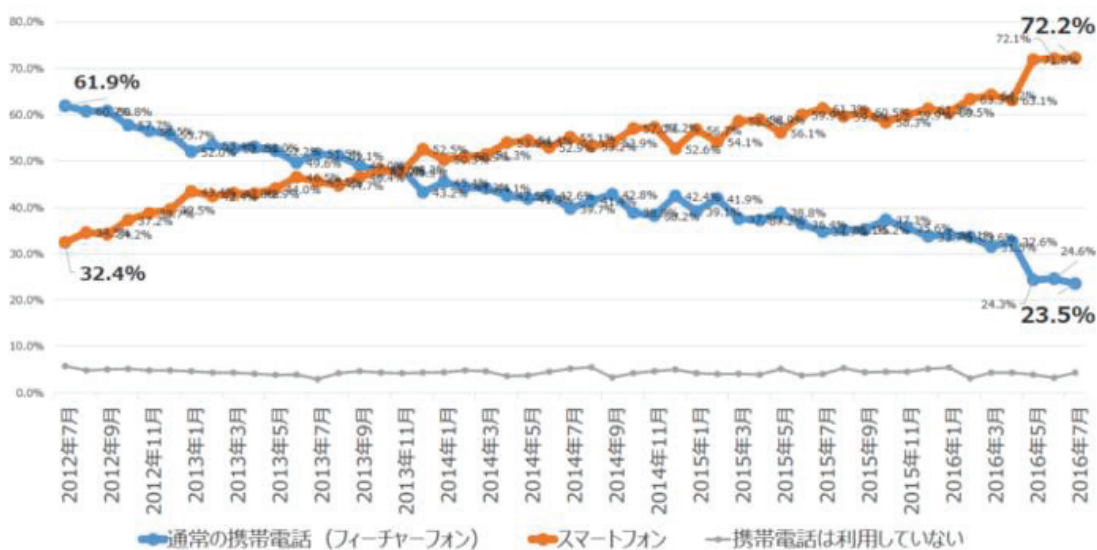


図 1.1 2012～2016 年におけるスマートフォン普及の推移

20 年前の傾向としては、携帯電話はまだ単なる移動中の通信端末でしかなく携帯型の高機能電子端末は圧倒的にノートパソコンが主流であった。当時ノートパソコンに求められたものは、大容量のハードディスク、光学式のドライ

ブなどによるマルチメディア機能の融合であったが、インターネットにおけるインフラの整備・充実・通信速度の高速化に伴い、画像や動画等のサイズの大きなマルチメディアファイルは遠隔地のサーバーに保存されるため、携帯端末自体にこうした記憶デバイスを装備する必要がなくなった。また、フラッシュメモリの低価格化・大容量化により体積の大きいハードディスクは携帯端末では全く使用されなくなった [1]-[8]。こうした背景から、各種センサーを小型の MEMS デバイスに置き換えることで、同じ端末の容積内により多くのデバイスを装備することで多機能化が実現されるようになった。

一方で携帯電子端末が小型化・高機能化されより、多くのユーザーが移動時に端末を利用する機会が増加した。これにより、移動中に動画を撮影し、その場で加工したものを転送する場合、これまではない或いは、技術的に不可能と思われる端末利用のニーズも増えたことから劇的に普及した。携帯電子端末の高性能化と小型化は古くしかも多くの機械的な部品、光学的な部品を小型化・軽量化することで携帯電子端末自体の性能や小型化を犠牲にすることなく、数多く搭載されるのが可能となった。一般的に小型化された部品として認知されているのはカメラやマイクなどだが、GPS センサー、加速度センサー、SAW フィルター、LED バックライトなど、ユーザーがあまり意識せずに使っているデバイスも携帯電子端末には数多く搭載されている。こうした既存のデバイスを小型化するには、従来人の手と機械加工で製造されていた部品を半導体の製造技術で製作できるデザインに置き換えることで実現された。また、半導体製造技術を導入することにより小型化、量産化が行われることで、結果的に低コスト化も実現され、機器への実装数が飛躍的に増えたと考えられる。

表 1.1 代表的なアプリケーションと MEMS センサーの種類を示している。こうした携帯端末に使用される電子デバイスは小型化、軽量化のために性能を犠牲にできない。一方で CPU やメモリーチップのような高い集積度を求められるデバイスではないため、形成されるデバイス部分の細線化はそれ程求められないが、犠牲層エッチング、深堀エッチング、異方性エッチングなどを使って

立体的な構造体を形成するといった特殊な形成技術を適用して高性能を実現している。またこうした特殊な技術で形成された構造体も、使用される環境によっては、腐食などにより長期間にわたって性能を維持できないことが多い。

表 1.1 代表的なアプリケーションと MEMS センサーの種類

アプリケーション	MEMS デバイス	製品
車載	<ul style="list-style-type: none"> ● ジャイロセンサー ● 磁気センサー ● 圧力センサー ● GPS センサー ● 赤外線アレイセンサー 	<ol style="list-style-type: none"> 1. エアバッグ 2. タイヤ圧モニター 3. カーナビ
IT 機器	<ul style="list-style-type: none"> ● MEMS マイク ● RF スイッチ ● GPS センサー ● 光学センサー ● インクジェットヘッド 	<ol style="list-style-type: none"> 4. スマートフォン 5. タブレット PC 6. プリンター
光学機器	<ul style="list-style-type: none"> ● 光学センサー ● マイクロミラーアレイ ● GPS センサー 	<ol style="list-style-type: none"> 7. デジカメ 8. プロジェクター
医療	<ul style="list-style-type: none"> ● ガス流量センサー ● マイクロポンプ 	<ol style="list-style-type: none"> 9. 健康モニタリング機器

主に民生品での利用を考えると 3 年～5 年といった長期の性能保証が必須なので、外部環境からの構造体の隔離、保護を厳重にするパッケージング技術が非常に重要となる。

センサー等の部品がそれほど小型でなければ、個々の部品ごとにパッケージングを行うこともできる。しかし、チップサイズの部品となると、個々の部品

ごとにパッケージを行うのは信頼性の面からも好ましくなく、何より手間がかかるためコストダウンの実現も難しくなる。今日では、半導体の製造工程で MEMS デバイス形成が完了したウェーハを、各デバイスに切り分ける以前に別のウェーハで蓋をするという、ウェーハレベルパッケージング (WLP: Wafer Level Packaging) が主流となっている。WLP では MEMS デバイスが形成されたウェーハと蓋をするウェーハについてミクロン単位で位置合わせを行い、接着剤等を使って接合するという技術が不可欠となる。

図 1.2 は、従来のパッケージング工程を示している。方式は CPU, メモリー, LSI といった半導体デバイスの製造で広く使われている製造工程で、ウェーハ上に集積回路を形成し、ダイシングという工程にて数ミリから数十ミリ角の大きさに切り出される。

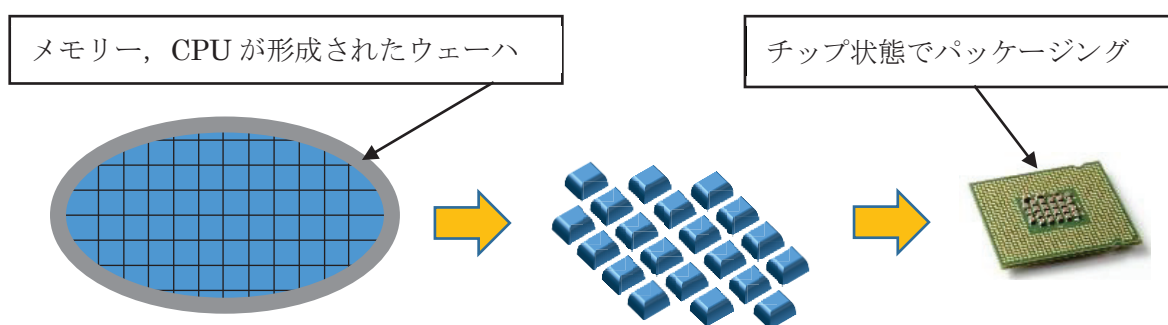


図 1.2 従来のパッケージング工程

切り出されたチップは別の基板に取り付けて、ワイヤーボンディングなどの工程で回路基板上に実装するための配線を行う。最後に外部の環境から保護するための保護層を設けてパッケージングが完了する。つまり、従来の半導体デバイスを製造する上ではチップサイズも比較的大きく、一枚のウェーハにデバイスを形成するので、チップ単位でのパッケージング技術が必要十分であった。

一方 MEMS デバイスは集積度を高くする必要が無いため、量産性を高める目的で小型化が進んでおり、例えば 2000 年頃には 10 mm 角程度の大きさだった MEMS 加速度センサーは現在では数 mm 程度にまで小型化が進んでいる。MEMS デバイスの構造体を形成するには一般的な半導体製造工程の多くが用いられるが、形成した構造体を外部環境から保護するために、キャッピングと呼ばれる蓋を取り付ける工程が必ず必要になる。その際、数 mm のチップ上に正しい位置に蓋を固定するのは量産性が低く、難易度も高いため MEMS デバイスが形成されたウェーハの状態、別のウェーハを用いて全体に蓋をする。図 1.3 MEMS デバイスのパッケージング工程を示している。2 枚以上のウェーハが積層された構造体は、CPU やメモリー等の一般的な半導体と同様、ダイシングという工程において積層されたまま個々の部品に切り落とすことでパッケージングが完了しデバイスチップとなる。これによって先に述べた通りパッケージングとしての信頼性を維持しながらも大量生産でコストダウンを実現できる。また、全てウェーハ単位で製造することのもう一つの利点は元になるウェーハの面積を広くすることでより量産化、コストダウンが比較的容易に得られるという点がある。

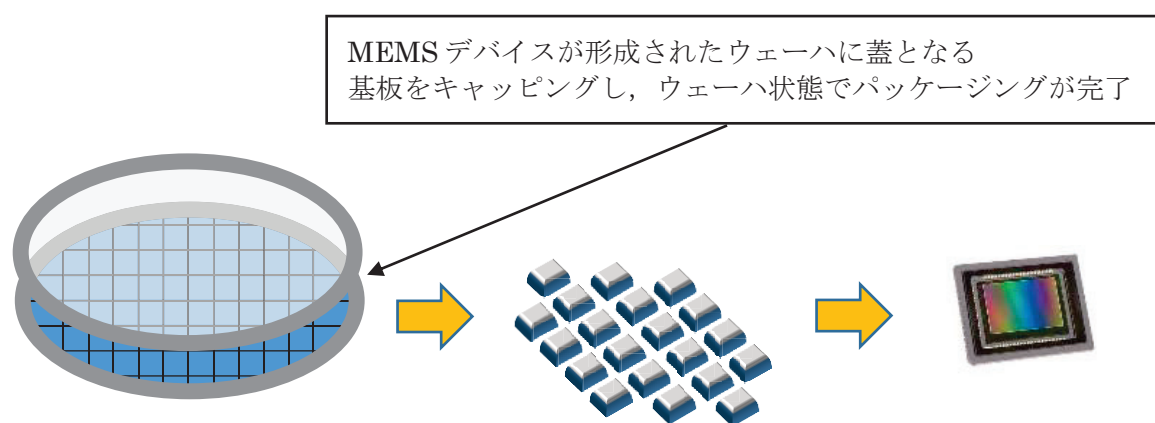


図 1.3 MEMS デバイスのパッケージング工程

CPU やメモリーなどの一般的な半導体の業界では、既に 300 mm のウェーハが広く採用され、更に面積の大きい 450 mm ウェーハも採用が検討されている。こうした半導体デバイスでは、集積度を高めると同時に小型化も進めなければいけないといった、相反する技術要求を実現する必要がある。単純にウェーハの面積を広くすれば量産効果が高くなるとも限らない。また、450mm ウェーハのプロセスに対応できる装置は全て新規導入する必要がある点もコストダウンに影響する。

一方、MEMS のようなセンサーデバイスは、当初 4 インチ、6 インチのウェーハが主流であったが、量産によるコストダウン効果の大きいものから 8 インチウェーハへの移行が進んでいる。MEMS デバイスでは集積度を高める必要が無い。そのため基本的にはウェーハの面積を広くすれば量産効果が得られる。

また、既存の半導体製造プロセスが適用できるため、装置をはじめ既に導入済みのリソースが活用できるので、新規に設備投資をする必要が少なくて済むことも大きなメリットの一つである。

MEMS デバイスのパッケージングにおいて、ウェーハを積層し固定するための接合技術が大きな課題となる。例えば、機能の異なる複数のデバイスウェーハを一つのチップとしてパッケージングするような場合も想定される。

図 1.4 は、それぞれ MEMS デバイスのパッケージング技術における課題を示している。(a)と(b)は、それぞれ複数の異なるデバイスの積層と膨張係数の違いの吸収を表している。デバイス同士を電氣的に接続するため、それぞれのチップから引き出された電極を数十ミクロン単位で位置合わせを行う必要があり、そのためには高いアライメント精度を維持できる接合技術が重要となる。プロジェクターの基幹部品として使われるマイクロ・ミラー・アレイといった光学系の MEMS デバイスでは、シリコン基板に膨張係数の大きく異なる透明基板を用いてキャッピングする (図 1-4(b))。

通常キャッピング工程は 400°C といった高温下で行われることが多いため、2 枚のウェーハにおける膨張係数の違いによる残留応力によるデバイス性能への影響をできるだけ低くする接合技術も需要である [9]-[15]。

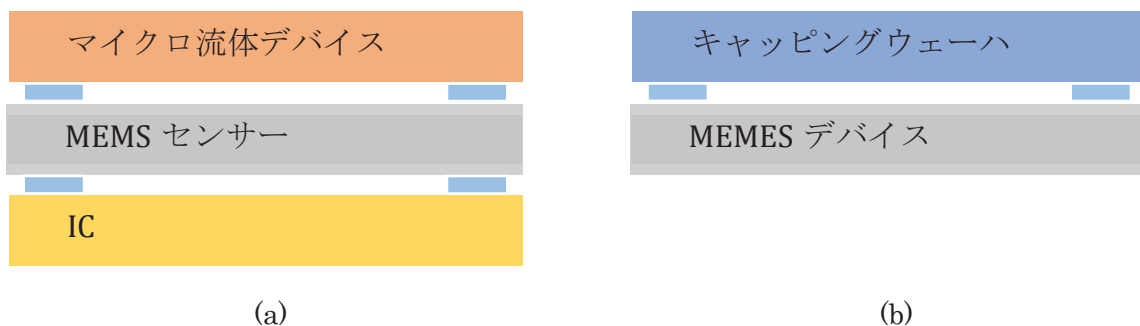


図 1.4 MEMS デバイスのパッケージング技術における課題
(a)複数の異なるデバイスを積層, (b)膨張係数の違いを吸収

図 1.5 は、MEMS デバイス特有のキャッピング構造を示している。(a)と(b)は、それぞれ配線を引き出す技術とアスペクト比の異なる構造体のキャッピングを表している。機械的構造の MEMS デバイスを駆動し、センサーデバイスか

らの信号を外部に取り出すには配線が必要となるが、接合プロセス時に外部に配線を取り出す設計にすれば、配線工程を簡略化することが可能となる（図 1.5(a)）。1つの MEMS デバイス上にアスペクト比が高い構造体と、低い構造体が混在するような場合は、キャッピング側のウェーハをアスペクト比の高いものに合わせて加工する必要がある（図 1.5(b)）。元の基板をデバイスの形状に合わせて高い精度で加工するにはサンドブラストやエッチングなどの技術が適用できるが、精度の観点やコストの観点から深掘りには限界がある [16]-[31]。したがって、できるだけそうした母材への加工を行わずに、簡単でしかも低コストでキャッピングのできる接合技術が求められている。

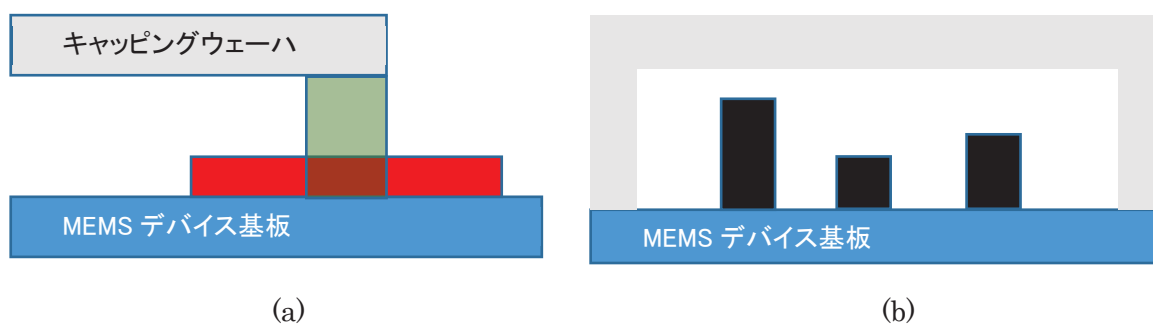


図 1.5 MEMS デバイス特有のキャッピング構造
(a) 配線を引き出す技術, (b) アスペクト比の異なる構造体をキャッピング

1.2 論文の目的と論文の構成

目的

- ① 近赤外線がシリコンウェーハに対して透過性を持つことを利用して、重ね合わせた 2 枚のウェーハの内側に存在する樹脂を、外部から加熱して部分的に接合を行い 2 枚のウェーハを仮固定することで、永久接合プロセスに

おけるウェーハ間のアライメントを高い精度で維持することができるか
検証を行う。

- ② 前述の仮固定では永久接合プロセスにおいて加熱による影響の少ない,熱
硬化性樹脂の適用が期待されるが,一般的に熱硬化性樹脂は熱可塑性樹脂
に比べ接着性が低く,接合材料としての実績が少ない為,試験片を用いて熱
硬化性樹脂でも十分な接合強度が得られるか検証を行う。
- ③ 近赤外線を用いた仮固定により,永久接合時のアライメントのずれを抑制
することができ,またその際に接合材料として熱硬化性樹脂が適用できる
と仮定し,これらの技術がデバイスの製造に応用できるかを,実際にマイク
ロ流体デバイスを試作して検証する。

論文の構成

- 第1章 序論
 - 1.1 研究の現状
 - 1.2 論文の目的と論文の構成
- 第2章 ウェーハ接合技術
 - 2.1 序言
 - 2.2 直接接合
 - 2.3 陽極接合
 - 2.4 共晶接合
 - 2.5 拡散接合
 - 2.6 熱可塑性樹脂
 - 2.7 熱硬化性樹脂
 - 2.8 ガラスフリット接合
 - 2.9 レーザーボンディング
 - 2.10 結言
- 第3章 ウェーハのずれとアライメント
 - 3.1 序言 既存接合技術とウェーハのずれ
 - 3.2 アライメントの重要性

- 3.3 接合装置によるずれ抑制のアプローチ
- 3.4 薄膜アルミパターンによるずれの防止
- 3.5 熱硬化性樹脂の可能性
- 第4章 近赤外線を用いた局所的な仮固定
 - 4.1 樹脂（ポリイミド）を使った接合プロセス
 - 4.2 近赤外線による局所的仮固定
 - 4.3 局所的な仮固定の方法
 - 4.4 実験機系
 - 4.5 アライメント精度の検証（ポリイミド）
 - 4.6 アライメント精度の検証（BCB, SU-8）
 - 4.6.1 BCB
 - 4.6.2 SU-8
 - 4.7 商業ベースの装置開発
- 第5章 接合したデバイスの引張り試験
 - 5.1 接合強度の確認方法
 - 5.2 試験サンプルの準備
 - 5.3 試験方法と条件
 - 5.4 強度試験の結果
- 第6章 デバイスへの応用
 - 6.1 マイクロ流体デバイスの試作
 - 6.2 デバイス製造工程
 - 6.3 結果と検討
- 第7章 結論
 - 7.1 結論
 - 7.2 今後の課題

第2章 ウェーハ接合技術

2.1 序言

ウェーハ同士を接合するには、デバイスに求められる性能と技術的な難易度、コストとのバランスを考慮して、最適なものが選ばれる。

表 2.1 は、代表的なウェーハ接合方式の特徴を示している。代表的な接合方式には接着剤となる接着媒体を用いるものと、材料間での分子結合を促すものに別れる。一般的にウェーハ接合のプロセスは 300°C~400°C の高温で行われることが多いが、デバイス性能への影響や異なる材質のウェーハを組み合わせた際の残留ヒステリシスなどを考慮し、100°C~200°C 程度の低い温度で接合する方法も研究されている。

表 2.1 代表的なウェーハ接合方式の特徴

貼合わせ方式	貼合わせ温度	接合界面	接合状態	アライメント精度
直接接合	20°C-400°C	固相	機械的	0.4 μm
陽極接合	350°C -450°C	固相	機械的	1 μm
拡散接合	300°C - 450°C	固相	機械的+電氣的	0.6 μm
共晶接合	200°C - 400°C	液相	機械的+電氣的	1 μm
樹脂接合	50°C - 300°C	液相	機械的	1-5 μm
ガラス フリット接合	400°C - 450°C	粘着	機械的	>5 μm

2.2 直接接合

携帯端末の小型化に伴いデバイスチップの薄型化も常に求められている。デバイスチップ（ここでは特に CPU やメモリーといった集積回路を言う）を薄くするには、単純にウェーハの片面を機械的に研磨することでも薄化を実現できるが、ウェーハ貼り合せ技術を応用した Smart Cut 技術により、薄い SOI (Silicon On Insulator) 基板を比較的低いコストで製造することができる。これは、デバイスを形成する側のウェーハに酸化膜を形成しておき、その上に十分厚みのある Si ウェーハを貼り合せてから、必要な部分だけを剥離して酸化膜上に残すという手法である [32]。

貼り付ける側の Si ウェーハには、任意の深さに水素イオンを注入（ドーピング）しておき、永久貼り合せ後に過熱することでデバイスを形成するのに最低限必要なアクティブ層だけを元の基板から剥離することができる。このとき転写元のウェーハは再度イオンを注入して再利用することができるため、材料の無駄が少ないことも大きなメリットの一つである。

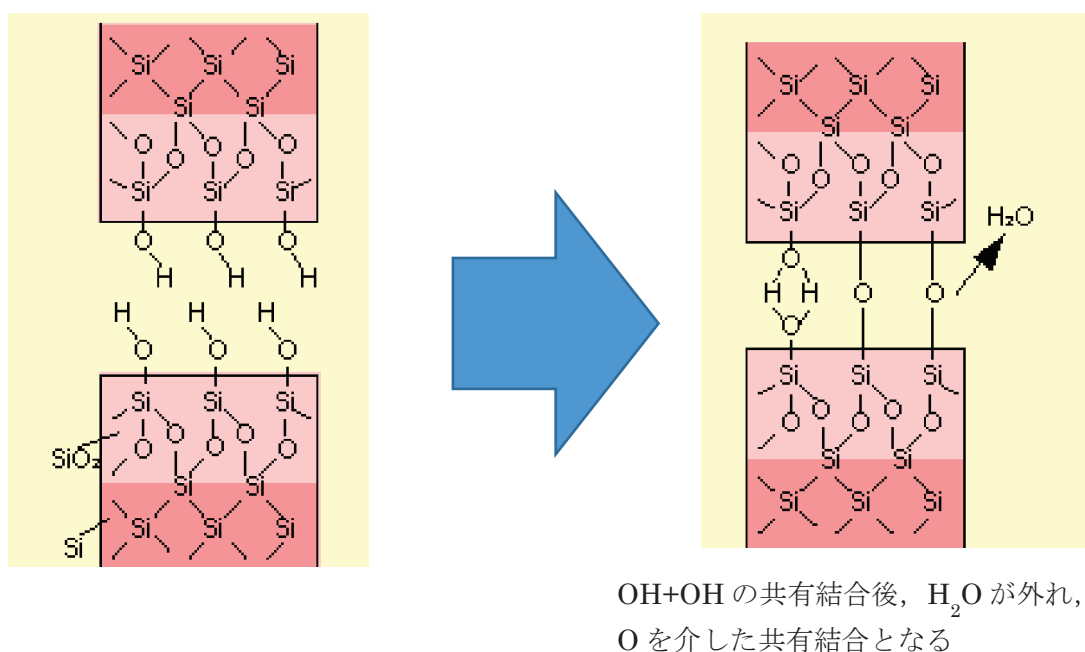


図 2.1 Si 基板における直接接合のメカニズム

この SOI ウェーハの製造で使われているのが、直接接合と呼ばれる接合技術である。分子間接合力を応用するので、分子と分子ができるだけ近づくことができるようにするという目的で、ウェーハ表面を鏡面研磨レベルで平滑化する必要がある。そうすることで 2 枚の基板を重ね合わせたときに各基板表面の分子間の距離が極めて短くなり、Si 分子同士が酸素を介して共有結合する。図 2.1 は、図 2.1 Si 基板における直接接合のメカニズムを示している。酸化膜の無い Si 基板同士を接合する際は、空気中の酸素を取り込んで共有結合が行われるが、その際に発生する H₂O が接合界面に留まって、気泡を形成して欠陥となってしまうため、表面に SiO₂ の酸化膜が形成された基板を使用し、共有結合により H₂O が発生しても SiO₂ の分子間に H₂O 分子が取り込まれるようにして気泡による欠陥の発生を防ぐ。

2 枚のウェーハを重ねて 1 ヶ所を押さえつけてきっかけを与えてやると、一部が接合されることでその周辺においてウェーハ間に張力が生じ、更にその面積が広がって、ウェーハ全面が自発的に接合されるので、ウェーハ全体に均等に荷重を与えるような特殊な設備を必要としない。

最後に 1000～1100℃程度でアニーリングを行えば、2 枚のウェーハが分子レベルで永久接合される。直接接合ではウェーハとウェーハの間に接着剤となる中間材料が無いので、接合強度は極めて高い。直接接合技術はデバイスウェーハの製造ではよく使われているが、表面研磨の難易度が高く高温プロセスとなることから、MEMS デバイスの製造においてはあまり一般的ではない。

表面の研磨状態が良ければ、2 枚のウェーハを接触させるだけである程度の強度で接合することは可能である。しかし、真空雰囲気にてウェーハ表面にプラズマを当てて表面を活性化してから、大気中で直接接合を行うことで比較的低い温度でより高い接合強度を得る方法もある。

図 2.2 は、三菱重工工作機械製の超高真空での常温接合を可能とする装置を示している。また、大気中ではなく 1×10^{-6} Pa といった超高真空状態において、接合するウェーハ上の分子と分子の間に存在する吸着物質を限りなく減らすこ

とで、常温での直接接合を可能にした装置も存在する。超高真空下では機械駆動部分に潤滑油を使えないため、接合技術だけでなく真空潤滑技術が重要な技術の一つとなる [33]-[48].

本来、永久接合には高温プロセスを必要とする直接接合であっても、プラズマ活性化後の常温接合や超高真空下での常温接合であれば、高温プロセスが好ましくない MEMS デバイスの製造プロセスにおいても適用することができる。



図 2.2 三菱重工工作機械製の超高真空での常温接合を可能にする装置

2.3 陽極接合

1960年代に発見された貼合わせ方法である陽極接合は、MEMS製造の分野で以前から用いられている手法で、十分に吟味されており信頼性が高いため自動車に装備されているエアバッグを起動する加速度センサーなどに使われている。

図2.3は、陽極接合装置の略図を示している。図に示されるようにデバイスを加工したウェーハに同じ大きさのガラス基板を重ね、400°C程度の高温雰囲気下で両者に600V程度の高い電圧を与えると、ガラス基板内のイオンが移動することでSi同士が強固に分子結合される。接着剤のような中間材料を必要とせず、ガラス基板も一般的に普及しているものを使えるため、製造コストを抑えることができる。透明なガラス基板を用いるため、ウェーハ同士のアライメントは実際に位置合わせ用のアライメントマーク画像を見ながら行うことができるためアライメント精度は高く、また封止性能も高い。

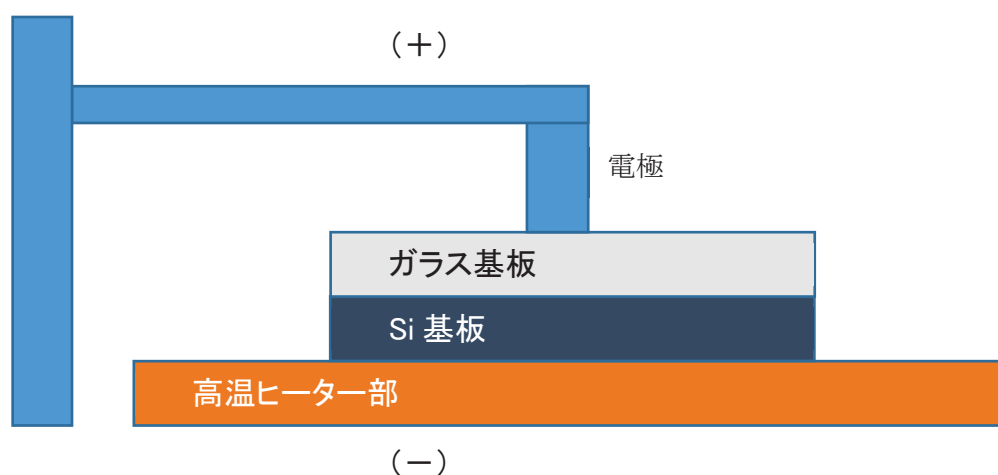


図 2.3 陽極接合装置の略図

通常ウェーハ同士の接合では、上下から大きな荷重を加えるが、陽極接合においては基板上の分子間にクーロン力が働くため、ウェーハ同士を密着させる以上に大きな荷重を加える必要が無いこともメリットである。

一方、デメリットの一つは 400°Cの高温プロセスである。プロセス中の温度がウェーハ上のデバイス性能に影響するという懸念があると同時に、材料の選択によっては膨張係数が異なる基板同士を高温下で接合するため、冷却後に内部ヒステリシスが残ってしまい、デバイスの性能だけでなく寿命にも大きく影響する [49]-[56]。また、接合時に発生するナトリウムによるデバイスの汚染の問題や、ウェーハ表面に汚染物質が存在するとその部分が未接合のまま残ってしまうといった問題もある。イオンの十分なドリフトを得るためのガラス基板上に電極膜を形成することで、基板間に生じる電界を強くすることができ、結果としてイオンの移動が促進されることで 200°C付近であっても 400°Cで接合したときと変わらない接合強度が得られたという報告もある [54]。

2.4 共晶接合

共晶接合とは、異なる二種類の金属を接触させた状態で、熱を加えることでそれぞれの金属が溶融して合金を生成することで、接着剤を使うようにウェーハ同士を接合する方式である。ウェーハ同士を機械的に接合すると同時に、金属を使用するため一方のウェーハからもう一方のウェーハに対して電気的な導通を取ることが大きなメリットであるため、共晶接合は高輝度 LED を製造する技術として検討されている。選択する金属の組合せと配分によっては接合時の温度よりも耐熱性の高い合金を生成することもできるので、デバイス性能における影響を抑えながら高い封止性能や接合強度を得ることができる。

図 2.4 は、Au-Sn の平衡状態図を示している。金属はスパッタリング工程にて処理する。接合時に接合界面の金属同士の一部が触れていれば良いので、ウェーハの最表面はそれほど平坦に研磨する必要がなく、ウェーハ準備段階での加工については難易度が高くない。デメリットとしては共晶反応を起こすための金属の選択が非常に難しいことである。このために接合温度の条件や生成された合金の性質、接合強度などを考慮して選ばなければいけない。また、場合に

よっては母材基板との接着性を良くするために他の金属層を中間に設けるなど設計が困難で、工程が増えることでコストが高くなるデメリットもある。共晶反応を起こす代表的な金属の組み合わせには Au-Sn や Au-In などあるが、高価な金属材料を使うことが多く製造コストが高くなってしまふ。合金を生成する過程で、接合界面において金属が流動性を示して（液相）、ウェーハが大きく

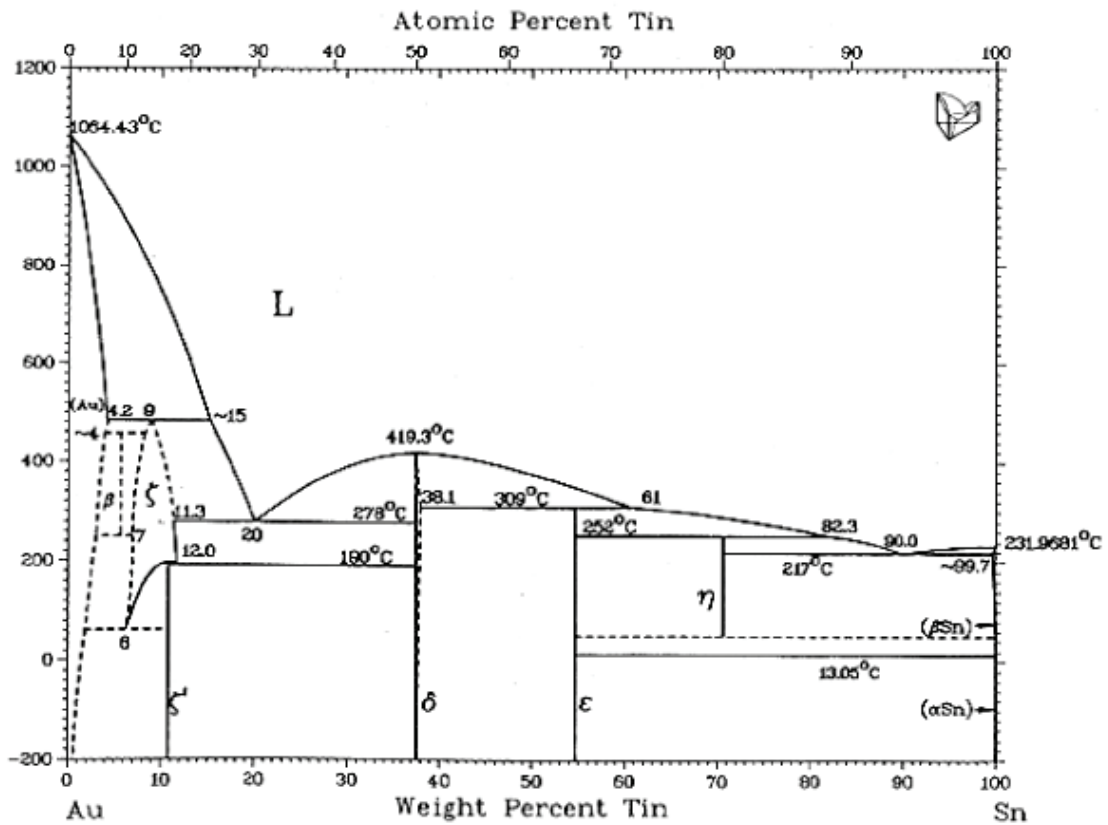


図 2.4 Au-Sn の平衡状態図

ずれる場合があるので、一般的な樹脂の接着剤を使用するのと同様、高いアライメント精度が必要なアプリケーションでは検討が必要となる。

2.5 拡散接合

共晶結合では異なる二種類の金属を用いるが、同じ種類の金属を使用して接合するのが拡散接合である。金属の分子間距離を物理的に短くした状態を維持すると金属分子が互いに拡散し合うことで強固な分子結合となる現象を応用している。

図 2.5 は、拡散接合の概略図を示している。分子間の距離を短くするため、重ねあわせたウェーハの上下から荷重を加え、また拡散を促進するために $300^{\circ}\text{C}\sim 400^{\circ}\text{C}$ の熱を与える。接合材料となる層に金属を用いるため、金属層は単に接着層として使用するだけでなく、ウェーハとウェーハの間で電気的な導通をとることもできるため、様々なアプリケーションに応用が可能であり、また封止性能も他の接合方法に比べるとはるかに高い。

また、同じく接着層に金属を使う共晶接合のように、接合プロセスの途中で金属が液相となって流動性を持つことがなく、固相の状態で作られるのでウェーハ同士のずれを抑制することができる為、高いアライメント精度を必要とするデバイスにも応用が可能である。

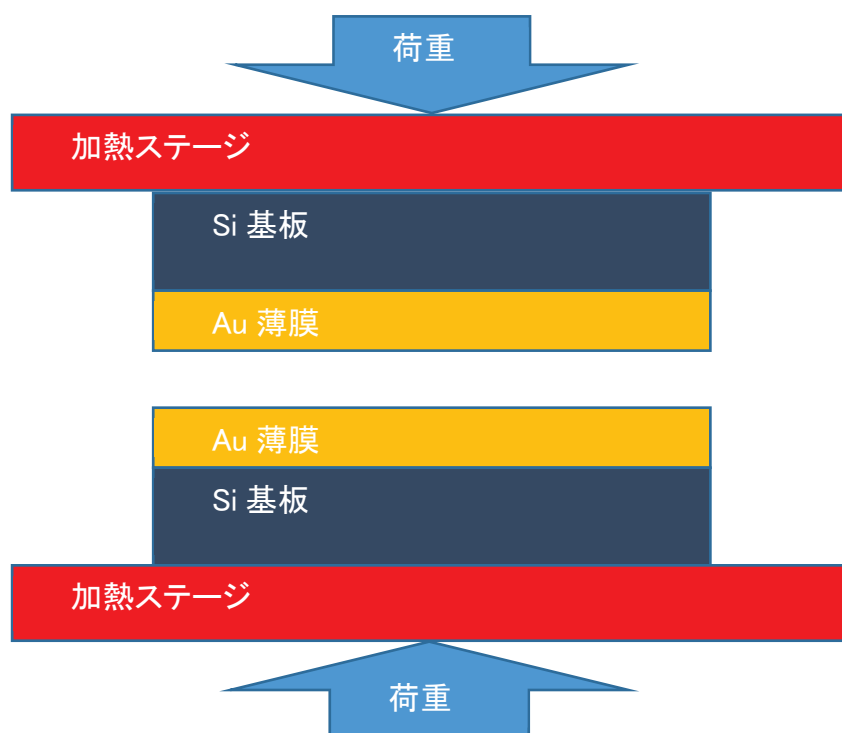


図 2.5 拡散接合の概略図

MEMS デバイスの製造に使用する場合にはデバイスが形成されたキャビティ一部分の側壁の形状に合わせてフォトリソグラフィを行うことで正確にパターンニングを行う必要がある。接合強度が高く、アライメント精度を高く維持できる接合方式であるが、厚膜を形成するのが難しい代表的なウェーハ接合方式の特徴というデメリットもある（コスト、加工難易度）。

一般的な Au を用いた拡散接合では Au は Si との密着性が高いので、接合する各シリコン基板に Au の層をスパッタリングにて形成し、各ウェーハ表面の Au-Au 間で拡散させる。また Au が安定していて酸化しにくいいため、表面に拡

散を妨げる酸化膜を形成しにくいので、大気中での扱いが容易であるというメリットがある。技術的に難易度が高い点として、金属分子間の距離を短くするため高い精度で金属の最表面を平滑化する必要がある点と、400°C近くという比較的高い温度で処理しなければ十分な接合強度を得ることができない点である。

平滑化するための金属の表面研磨は、一般的な半導体デバイスの製造行程ではあまり使われないので、その為に新たに装置を導入する必要があるなど参入障壁が高い側面もある。逆に平滑化を十分に行えば、100°C程度の比較的低い温度でも接合でき、十分な接合強度が得られる [57]-[60]。

一方で、他の金属では拡散接合ではなく、温度、表面研磨精度の条件を最適化することができれば、Cu や Al の金属でも拡散接合は行うことができる。例えば Cu を用いて拡散接合する場合は、接合の直前に真空雰囲気チャンバー内で、ギ酸による金属表面の酸化物を還元するといった特殊なプロセスが必要となる [61] [62]。

2.6 熱可塑性樹脂

図 2.6 は、熱可塑性樹脂を使用した接合の概略図を示している。熱可塑性樹脂を用いる接合方法には BCB (Benzocyclobutene) があり、液体の状態で樹脂を塗布するため、接着するウェーハの表面を高い精度で平滑化するなどの事前の処理を行わなくても十分に平坦な面を形成することができる。接合前に接着剤を塗布する工程が必要となり、スピンのコーターもしくはスプレーコーターなどの装置を使用してウェーハ表面に樹脂材料を均一に塗布することができる。製造コストに大きく影響する材料使用量の観点からは必要な部分に必要な量だけを塗布する方式のスプレーコーターが優れており、膜厚の均一性の観点からウェーハを回転することにより遠心力で不要な材料を飛ばす方式のスピンのコーターが優れている [63]。

塗布時の樹脂は室温で行い、その際は流動性を保つので、塗布後は 170°C 前後でソフトベークを行う。接合する際はウェーハの密着性を高めるため上下から荷重を加え、樹脂が熔融するように加熱する。高温下では樹脂が液相を示しており、また荷重により接合界面にはせん断方向の応力が生じるため、プロセス中にウェーハがずれて、アライメント精度は低くなる傾向がある。プロセス中にウェーハがずれないようにする試みとして、樹脂層をできるだけ薄くすることで液相を示した際の影響を少なくする方法もある。そうした薄膜層を用いてウェーハ同士を接続する場合、BCB 膜厚 0.6 μm 、永久接合時の昇温速度 32°C/分、ソフトベーク温度 170°C の条件では最大で 20 μm 以上のずれが生じるので、改善策として昇温速度を 3°C/分と遅く、190°C でソフトベークを行ない、ある程度樹脂を事前に硬化させておくことにより、BCB 膜厚 0.6 μm 、2.6 μm でも位置ずれが 1 μm 以下の良好なアライメント精度が得られる報告もある [64]-[77]。一方で、プロセス時間が通常の 10 倍以上と極端に長くなるというデメリットもある。そうした背景から、BCB といった熱可塑性樹脂を使ったウェーハ接合は、それほど高い精度を求められないデバイスの製造においては広く適用されている。

一般的に接着剤は半導体の製造工程で広く使用されており信頼性の認められた材料が数多く存在する。BCB だけに限らず、ウェーハ接合の工程では通常エポキシ系の樹脂や、熱可塑性の樹脂を使うことが多い。前述のように樹脂材料は産業界で広く利用されているため、材料コストが安価、取り扱いが容易である反面、熱可塑性樹脂を使う以上耐熱性が低く、封止性も高くない。BCB の場合では、耐熱温度は 350°C 前後となる。表 2.2 は、硬化後の BCB の性質を示している。

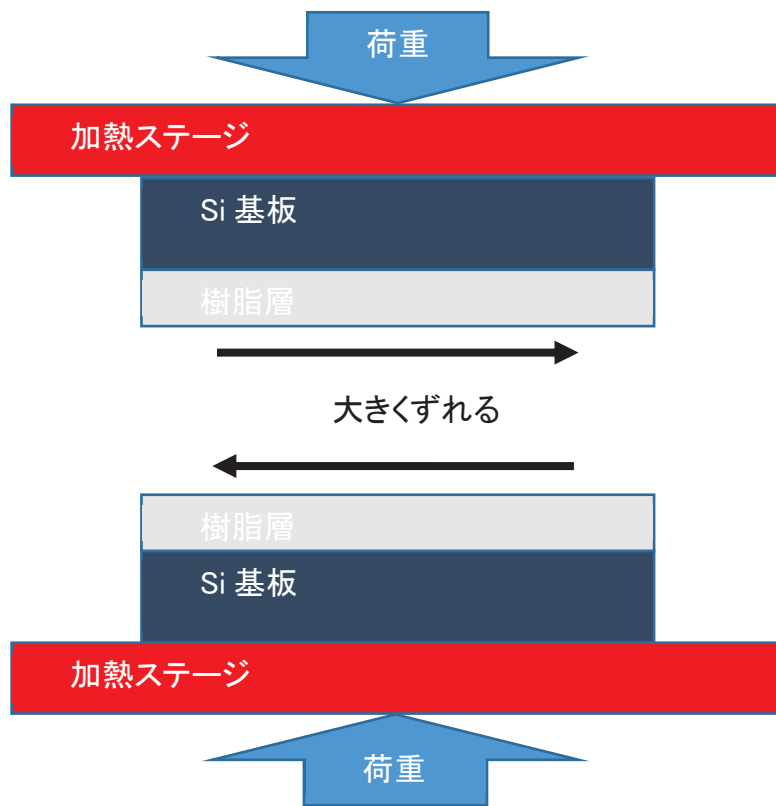


図 2.6 熱可塑性樹脂を使用した接合の概略図

表 2.2 硬化後の BCB の性質

誘電率 10kHz	2.7
誘電正接 10kHz	0.0008
絶縁破壊電圧	$4.0 \times 10^3 \text{V/cm}$
体積抵抗率 $\Omega \cdot \text{cm}$	$9.0 \times 10^{19} \text{ncm}$
熱膨張係数 TMA, 25~300°C	65~70ppm/°C
吸湿度 24hr, 100°C	0.23wt%
熱安定性 (窒素中)	350°C
ガラス転移温度 TMA	>350°C
曲げ外注率 DMA, 25°C	475,000psi
ヤング率	340,000pSi
屈折率	1.55

感光性のあるエポキシ樹脂の SU-8 は、MEMS においてウェーハ上に立体的な構造体を形成する際、一般的に使用される材料だが、ウェーハ接合における接着材料としても検討されている。粘性が高く、スピンドクターやスプレーコーターを使用してウェーハ上に薄膜、厚膜を形成することができるので、パッケージングへの応用も期待できる。

表 2.3 は、SU-8 の物性を示している。表に示されるように、SU-8 はより適用範囲が広いため、MEMS デバイス、マイクロ流体デバイスの作製だけでなく、ナノインプリント・リソグラフィにも使用されている。ただし、他の樹脂と同様、150°C前後の接合温度では液相となるため、高温下で上下から荷重がかかった状態で、高いアライメント精度を維持することは難しい。SU-8 をウェーハ接合の材料として使うことの大きなメリットの一つとして材料の透明性があり、

イメージセンサーやマイクロ・ミラー・アレイといった光学部品の作成において有効である [78]-[85].

表 2.3 SU-8 の物性

密着強度 (MPa)	Si: 71 SiO ₂ : 23 SiO ₂ +HMDS: 44
ガラス転移点 (°C, DMA tan δ)	198
熱安定性 (°C, @5%wt. loss)	357
引張強度 (MPa)	73
引張弾性率 (GPa)	2.0
破断点伸度 (εb%)	4.8
誘電率 (1GHz, 50%RH)	3.2
誘電損失 (1GHz)	0.033
体積抵抗率 (Ω cm)	1.8×10^{16}
吸水率 (% , 85°C / 85%RH, 120h)	0.5

2.7 熱硬化性樹脂

図 2.7 は、熱硬化性樹脂を使用した接合の概略図を示している。樹脂を使ったウェーハ接合においては、アライメント精度を維持するのが難しいというデメリットがあることは先に述べた。一方で熱硬化性の樹脂であれば、加熱しても液相にならないメリットはあるが、接着材料としては実績が無くあまり認知されていない。ただし、フィルム上のポリイミドを使って 300°C以下で接着を

行う製品も開発されているため、ウェーハ接合技術にも適用可能な材料と考えられる [86]-[88].

ウェーハ接合の準備としては、ウェーハ表面に熱硬化性樹脂を塗布してから 95°C程度に加熱して硬化（ソフトベーク）させた後、必要に応じてフォトリソグラフィによりパターニングを行う。この状態で樹脂は流動性を示さないが完全硬化前のまだ比較的柔らかい状態なので接着の機能が期待できる。

その後ウェーハ同士のアライメントを行ってから、300°C～400°Cに加熱し、上下から圧力を加えることで永久接合を行う。熱可塑性樹脂を使用した場合との大きな違いは、接合時の加熱中は液相とならず固相が維持されるため、上下から荷重とせん断方向の応力が印加された状態でも、比較的ウェーハ同士がずれにくいという性質がある。

そのため MEMS ように、2 枚のウェーハを高いアライメント精度を維持したまま接合が必要なデバイスに対して、適用範囲の広い接合方式となる可能性が高い。ただし、接合プロセス中にどの程度ウェーハがずれるか、永久接合後の接合強度を高くするための接合時の最適な温度条件、荷重条件はどれくらいかなど、実績が少ないため検証が必要である。

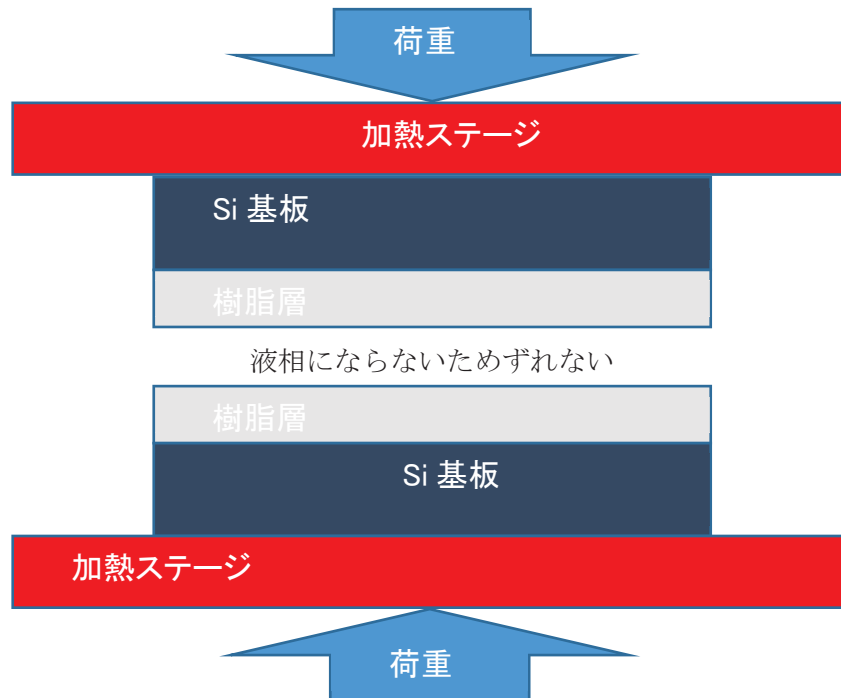


図 2.7 熱硬化性樹脂を使用した接合の概略図

2.8 ガラスフリット接合

スクリーン印刷などの技法を使って、ガラスの微粒子を混ぜ込んだペーストをウェーハ表面にパターンニングしておき、接着層として利用する接合技術を図 2.8 に示した。ウェーハ同士を重ね合わせた状態で、圧力を加えながらガラスの融点以上の温度を加えることで、ガラスが溶けることで接合が行われる。最大のメリットは、ガラスを使うことによる機密性の高さである。一方、スクリーン印刷ではパターン細線化が難しいため、通常は $30\ \mu\text{m}$ 程度が限界といわれており、結果として接合に使われる部分の面積が大きくなるためデバイスを作成する部分の面積が小さくなり、デバイスの小型化や歩留まりの低下に影響

する。また、低温で接合することができるガラスフリットも開発されているが、接合温度が高く一般的には 450°C程度にまで加熱する必要があるため、ウェーハ上に形成されたデバイスへの影響が大きい。

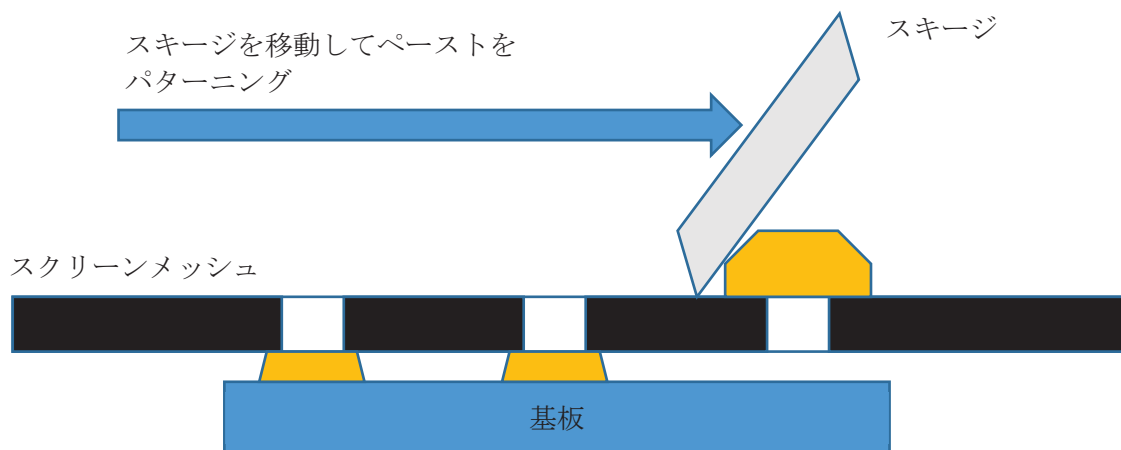


図 2.8 スクリーン印刷によるガラスフリットのパターニング

2.9 レーザーボンディング

透過性のあるウェーハ（ガラス基板）とシリコンウェーハの組み合わせにおいて、透明基板側から 532 nm の YAG:LASER を照射して接触界面を加熱することで 2 枚のウェーハを接合する方法も試されている [89].

ガラス基板とシリコン基板を平坦なベースプレートの上に乗せ、更にレーザー光が透過できるように透明プレートに乗せた状態で、ウェーハ同士の接触を促すために上下から 10MP の接触荷重を与える。図 2.9 は、収束レーザーを用いたボンディングを示している。

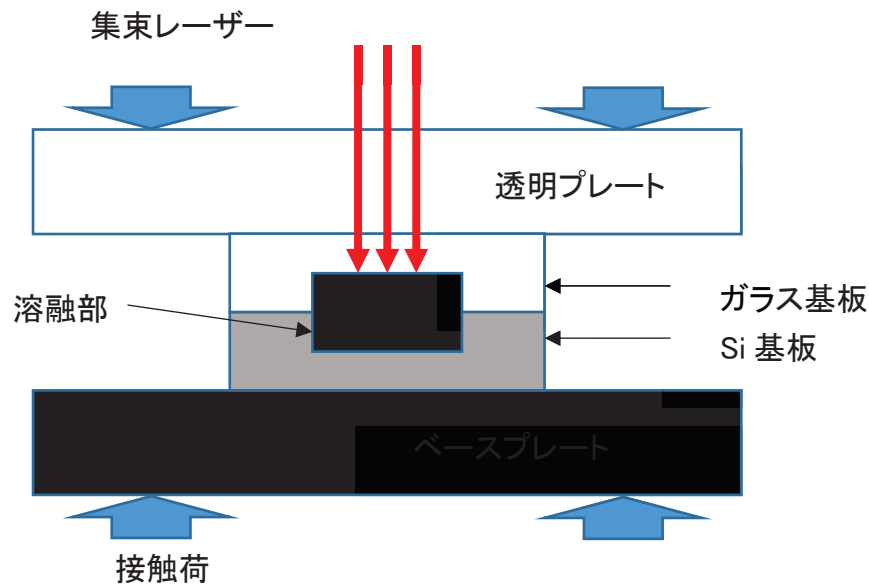


図 2.9 集束レーザーを用いたボンディング

接合界面が十分に接触されていないと十分な接合強度が得られないので、前処理としてウェーハ表面を研磨することによりウェーハ表面を平滑化する必要がある。直接接合と同様、接合界面に媒体を必要としないためアライメント精度の観点から、プロセス中にずれることはない。接合が必要な部分だけにレーザーを照射すればよいので、フォトリソグラフィプロセスで接着部分のパターンを形成する必要がないなどのメリットがある。反面、レーザーの照射された部分がスポット的に高温となるので、ウェーハ上に形成された MEMS デバイスへの影響が大きい。またレーザー照射部分を固定して、基板や支持プレートが搭載されたステージを XY 方向にスキャンするので、長いプロセス時間がデメリットとなる。

2.10 結言

ウェーハの各種接合方法にはそれぞれメリットとデメリットがあるため、製造するデバイスの特性や求められる性能、そして製造コストを考慮して最適な

ものが選ばれる。機械的な動作をする MEMS デバイスでは、信頼性の確認されている陽極接合が広く使われ、高輝度 LED では電極としての導通が必要なため共晶接合、高機能ウェーハでは直接接合といったように、デバイスの性質により適用できる接合技術は限られており、全てのアプリケーションで適用できるような万能の接合方法は存在しない。表 2.4 は各ウェーハ接合方式の特徴を示している。

本研究では、そうした様々な接合技術の中でも、樹脂接合において一定の条件をみたすことができれば、MEMS デバイスに求められる接合要求と、高いアライメント精度を同時に満たす可能性が高いと考えられる。

表 2.4 各ウェーハ接合方式の特徴

接合技術	接合時のずれ	技術難易度	製造コスト	備考
直接接合	小さい	高い	高い	SiO ₂ 基板が必要、鏡面研磨
陽極接合	小さい	低い	低い	残留ヒステリシス大きい
共晶接合	大きい	高い	高い	複数の金属をスパッタリング
拡散接合	小さい	低い	高い	金属層の平坦化は難易度高い
樹脂接合	大きい	低い	低い	熱に弱い、封止性能低い
ガラスフリット接合	大きい	低い	低い	パターンの細線化が難しい

第3章 ウェーハのずれとアライメント

3.1 序言 既存接合技術とウェーハのずれ

MEMS デバイスの製造においては Si 基板同士を接合するだけでなく、Si 基板とガラス基板、Si 基板と化合物半導体基板など、材質が異なるウェーハを接合する必要があり、接合技術においても応用範囲の広い方式が求められる。また、MEMS デバイスの構造は立体的で、その機能によりアスペクト比の高いものと低いものが 1 つのデバイス上に混在する可能性もある。その様な場合、キャッピング側のウェーハにそうしたアスペクト比大きなデバイスを収納できるようなキャビティをあらかじめ形成しておかなければならないが、加工難易度が高くなるため、比較的簡単なプロセスで実現できるようなウェーハ接合技術が求められる。接合において接着剤となる層に厚膜を適用すれば、基板自体を加工するのに対して加工難易度は低くなるが、接合の際にずれが大きくなる技術を検討しなければならない。もちろん、高価な材料を使わず、装置など新規に設備投資が不要などできるだけ製造コストを低くできる技術が重要となる。

3.2 アライメントの重要性

Siなどの基板の上に格子状に並んでいるMEMSデバイスを封止するには、各デバイスを囲んでいる部分に隔壁と呼ばれる壁を、デバイス側、キャッピング側の両方のウェーハに形成し、接合時に重ね合わせた際に御互いの隔壁部分が合わさることでMEMSデバイスを包み込むキャビティーを形成する。その際、ウ

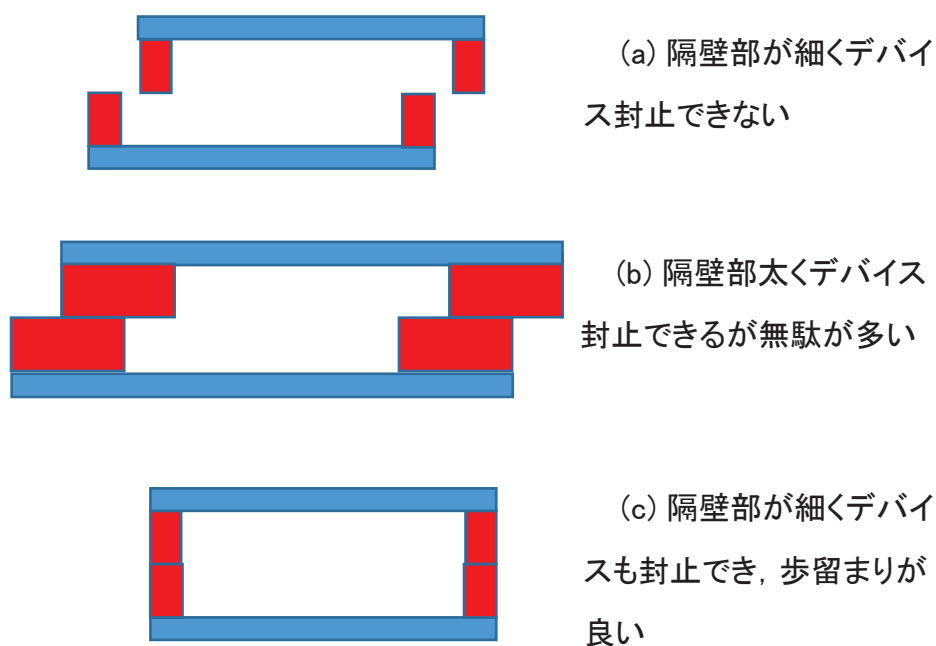


図 3.1 アライメントと隔壁パターンの関係
(a)隔壁部が細くデバイス封止できない、(b)隔壁部太くデバイス封止できるが無駄が多い、(c)隔壁部が細くデバイスも封止でき、歩留まりも良い

ェーハがずれてもキャビティー内にMEMSが収まるよう、ある程度の余裕を持って隔壁部の寸法をデザインする必要がある。

図 3.1 は、アライメントと隔壁パターンを示している。(a)、(b)と(c)は、それぞれ隔壁部が細くデバイス封止できない、隔壁部太くデバイス封止できるが無駄が多いと隔壁部が細くデバイスも封止でき、歩留まりも良いことを表している。図 3.1(a)に示されるように、当然、隔壁部を細く設計すればデバイスに使

える部分の面積が広くなり歩留まりを高くすることができる。同時にデバイスの小型化も実現できるが、少しのウェーハのずれでも MEMS デバイスがキャビティ内に収まることができなくなり、デバイスの性能や信頼性を損なってしまう。図 3.1(b)に示されるように、隔壁部を太く設計すれば大きなウェーハのずれをある程度吸収することができるが、デバイスに使える部分の面積が減ってしまうため歩留まりに影響する。同時に、デバイスも不必要に大きくなる。図 3.1(c)に示されるように、接合プロセスの過程で最初に 2 枚のウェーハのアライメントをあわせた後に、荷重がかかったり熱が加えられたりしてもウェーハがずれない状態で、隔壁部が細い設計の基板を接合すれば、封止ができて歩留まりの良い接合方式となる。

3.3 接合装置によるずれ抑制のアプローチ

ウェーハ貼り合せ時にずれが生じることの最も大きな理由は、接合中に接着を媒介する物質が軟化もしくは液相になることにある。先に説明した BCB や SU-8 といった樹脂は熱可塑性であるため、ウェーハ同士を永久接合させるにはガラス転移温度に達するまで温度を上げる必要があり、その過程で必然的に軟化する。共晶接合においては 2 種類の金属を共晶反応させることで全く性質の異なる合金を生成することができ、金属の組み合わせによっては比較的低い温度で反応を促進することができ、また生成された合金がそれよりも高い融点を



図 3.2 EVG 社製ウェーハ貼り合わせ装置

持つこともあるが、共晶反応が起きた時点では金属が一旦液相となるため、高いアライメント精度を達成するのは難しい。

図 3.2 は、EVG 社製ウェーハ貼り合わせ装置を示している。ウェーハは通常ある程度歪んでいるので、接着材料を塗布した状態で 2 枚のウェーハを接合したとしても、歪のせいで密着しない部分ができる。そのため、通常は専用に設計されたウェーハ貼り合わせ装置を使って上下から圧力をかけながら熱を加える。その際に液相となった接着材料は、まるで潤滑油のように作用するため、いかに精度良く垂直に圧力を加えたとしてもごく僅かなウェーハ厚の違いなどが原因で御互い左右にずれてしまう。

3.4 薄膜アルミパターンによるずれの防止

接合の過程で貼り合わせ界面が液相となる熱可塑性樹脂のような接着材料を使用し、高いアライメント精度を維持することができる技術も検討されている。

摩擦を増やしてずれ防止となるようなアルミパターンをウェーハ表面に形成するやり方で、アルミ薄膜は局所的なアンカーとして機能するが、接合には関係せずウェーハ全面は熱可塑性樹脂にて接合する。

片側のウェーハの接合面に、直径 12 mm で厚みが約 2.1 μm のアルミのダミーパターンを、ウェーハの外周に沿って 8 箇所形成する。このアルミ薄膜の表面が相手のウェーハ表面と接触しなければいけないため、接着剤は 2 μm 以下の厚みに制御しなければいけない。図 3.3 は、アルミ薄膜と Si ウェーハの間に生じる摩擦で重ね合わせたウェーハを示している。結果的にアライメント精度は仮固定したときから極端に低くなることは無く、5 μm 程度の高い精度を維持することができる [90]。

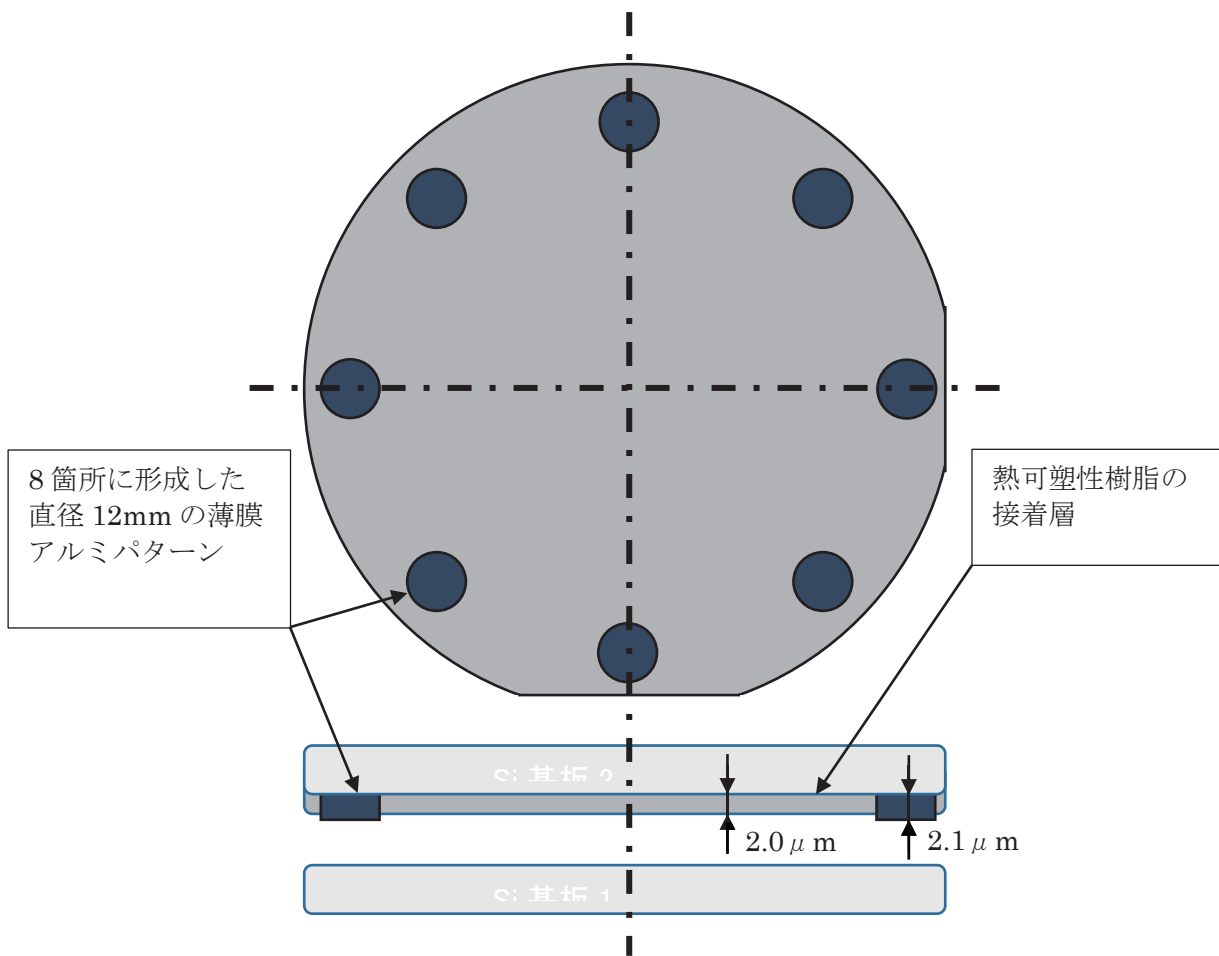


図 3.3 アルミ薄膜と Si ウェーハの間に生じる摩擦で重ね合わせたウェーハがずれない樹脂接合技術

MEMS アプリケーションの分野における、この接合方式での問題点はアルミの薄膜を形成する必要がある。したがって、(1)アルミ薄膜を形成し不要な部分を除去する工程が増えることによりコストがアップする、(2)アルミの薄膜パターンが比較的大きく、デバイスを形成する面積が減少することにより、生産効率が低くなるなどの点がある。また技術的な観点からの問題点として、通常 MEMS デバイスは構造体にある程度の高さがあるため、こうしたダミーパターンも厚膜で形成する必要がある。しかし、金属の圧膜形成は技術的に難易度が高く、また材料費の観点からも非常にコストがかかるので、現実的ではない。

3.5 結言

MEMS デバイスの多くは微小化された構造体が機械的に動作するものが多いため、異物の混入、湿気による腐食、様々なガスによる影響からデバイス部分を外部環境から隔離することが重要で、前述のように求められる性能やコストに応じて各接合方法が適用されている。そうした封止技術の選択においては一般的に、材料費が安く、取り扱いが容易で、特別な装置を必要とせず（初期投資を抑えることができる観点から）、冗長的なプロセスを必要としないという条件が求められる。樹脂材料はこうした条件の多くを満たしているため、接合材料として使うことができれば、低コストで求める性能を実現する可能性が非常に高い。

一般的に接着剤として使われるのは熱可塑性の樹脂が多いため、接合するプロセスの過程で一旦は高温状態にする必要があり、前述の通り高温状態で流動化の大きい熱可塑性樹脂では必然的に接合後に接合したウェーハ同士のアライメント精度が低下するという課題を克服する必要がある。この課題に対しては材料特性を考慮したプロセスからのアプローチは難しいため、装置等接合工程からのアプローチによる課題克服が求められるが、現時点で熱可塑性樹脂に対応したウェーハ貼り合せ後のアライメント精度を劇的に改善することのできる装置はまだ存在しない。

一方では熱硬化性樹脂をある一定の条件で硬化状態を制御してやれば、アライメントに影響が少ない程度に硬化させて、接着効果が得られる範囲の高温状態でも流動化が少ない状態で、ウェーハ同士の接合を行なうことができる。材料の選択肢として、一般的な半導体の製造工程で半導体素子表面の保護膜として広く使われている材料にポリイミドがある。ポリイミドは熱硬化性の樹脂で、感光性を持たせることもできるので、マスクライナーといった比較的安価な光学装置を使って、自由にパターンニングを行うことができるのも大きなメリットがある。

ポリイミドの比重は1.43と熱硬化樹脂の中では最も耐熱性に優れたプラスチックで、強固な分子構造を持っている。そのため、熱だけでなく、機械的性質や化学的性質も他の樹脂にない値を持つので、超耐熱エンブレと呼ばれることもある。

熱分解する温度は他のプラスチックの耐熱温度とは大きく異なり、500℃以上となっており、同時に耐寒性、耐摩擦性にも強い性質を持つ。通常の樹脂材料や汎用エンブレとは違って、低い誘電率、優れた伸び特性、熱膨張係数にも優れていることが知られている。表 3.1 は、ポリイミド樹脂の物性を示している。

表 3.1 ポリイミド樹脂の物性

物理的性質	密度 (g/cm ³)		1.43 から 1.51	1.9	1.45
	融点 (°C)	結晶性	熱硬化	熱硬化	熱硬化
		非晶性	-	-	-
	透明度		-	不透明	不透明
吸水率 (%) 3mm, 24h		0.32	0.2	0.6	
成形特性	成形温度範囲 (°C)		-	圧縮, 211 から 267	圧縮, 211 から 267
	成形圧力範囲 (kgf/cm ²)		-	10.5 から 42.2	10.5 か ら 42.2
	成形収縮率 (%)		-	0.1 から 0.2	0.6
機械的性質	引張強さ (kgf/mm ²)		6.3	19	4
	最大伸び率 (%)		4 から 9	<1	<1
	圧縮強さ (破壊, 降伏) (kgf/mm ²)		-	22.9	14.1
	曲げ強さ (破壊, 降伏) (kgf/mm ²)		10.5 から 12.0	34.8	12.8
	引張弾性率 (kgf/mm ²)		225 から 281	2000	-
	圧縮弾性率 (kgf/mm ²)		-	1720	-

	曲げ弾性率 (kgf/mm ²)	-	2253	633	
	アイゾット衝撃値 (kgf・cm/cm)	2.7 から 5.4	92.5	1.36	
	硬度 (硬さ)	ロックウェル	32 から 58	M120	
		ショア	-	-	
熱的 性質	熱伝導率 (10 ⁻⁴ cal/s/cm ²) / (K/cm)	—	12	3.5	
	比熱 (cal/K/g)	—	—	—	
	線熱膨張率 (10 ⁻⁵ /K)	—	1.5	1.5	
	熱変形温度 (°C) 18.6kgf/cm ² 4.6kgf/cm ²	>261	367	>306	
電氣的性質	体積抵抗率 (Ω・cm) (23°C, 50%RH 相対湿度)	10 ¹⁶ × 10 ¹⁷	5 × 10 ¹⁵	2 × 10 ¹⁶	
	絶縁強さ (短時間法) (3.18 mm) /kV/mm	15.7	19.6	—	
	比誘電率 (ε _γ)	60Hz	—	4.84	—
		MHz	—	4.74	—
	誘電正接 (tan δ)	60Hz	—	0.0034	—
		MHz	—	0.0055	—
化学的性 質, 耐薬品 性	燃焼性, 速度 (mm/min)	—	—	—	
	日光の影響	—	—	—	
	弱酸の影響	-	抵抗	抵抗	
	強酸の影響	-	抵抗	抵抗	
	弱アルカリの影響	-	少し侵される		
	強アルカリの影響	-	侵される		
	有機溶剤の影響	-	抵抗大		

ポリイミドの用途としては、フィルム、コーティング剤、保護膜、電気絶縁材料全般、ベアリング、耐熱塗料、断熱軸、断熱トレイ、電子部品、自動車部

品等があげられる。ポリイミドは先述の通り半導体業界で保護材料として広く使われている材料だが、ウェーハ接合の接着材料としては実績が少なく、まだ十分には認知されていない。

第4章 近赤外線を用いた局所的な仮固定

4.1 樹脂（ポリイミド）を使った接合プロセス

ここでは、樹脂を使用した接合プロセスについて工程の順に記述する。

①スピncerをういてウェーハ上に均一な薄膜を形成する。デバイスを封止することだけが目的なので厚い膜を形成する必要は無いが、スピncerが使えるため高い均一性を維持できるのがメリットの一つである。スピncerは一般的な半導体デバイスの製造工程で行われるフォトリソグラフィーにおいて、感光性フォトレジストのコーティングに使用される装置なので半導体製造現場の多くで採用されている。要求仕様によって膜厚を厚くする必要がある場合は、コーティングの回数を増やして薄膜を積層してやることで膜厚を正確に制御できることができるというメリットもある。MEMSをはじめとし、SAW デバイス、パワーデバイスといった電子デバイスの製造工程においては、デバイスが立体構造を持つため、凹凸に合わせた材料塗布の必要性があり、その際はスピncerでは対応できないため、上方から液体材料を霧状にして塗布するタイプのスプレーコーターが利用される。スプレーコーターであれば、必要な量の材料をウェーハ上にディスペンスすることができ、また1回の塗布で圧膜も形成することができるので、材料コスト、プロセスにかかる時間を削減することもできる。

②デバイスはウェーハ上に格子状に並んでいるので、接合する側のウェーハにもデバイスの形状に合わせて、ポリイミド膜上に同じく格子状のパターンを形成すれば倍のアスペクト高さを得られる。感光性のあるポリイミドを使ってコーティングしておき、フォトリソグラフィープロセスによって隔壁となる部分だけを残す。感光性ポリイミドを使用することでフォトリソグラフィー工程を用いることができ、数ミクロン単位で隔壁の線幅を制御できる点は、隔壁部分のパターンを必要以上に広くする必要が無いことから、デバイスを小型化する

る上で他の方式に比べ非常に大きなメリットである。（例えばスクリーン印刷で同様のプロセスを行った場合、現在の技術では数十ミクロン単位の隔壁部分となり、デバイスの小型化を阻害する要因の一つとなる。）また隔壁部分の幅を細くすることで、デバイスに利用できる面積が大きくなるため、1枚あたりのウェーハから切り出すことのできるデバイス数も増える。

③フォトリソグラフィで形成したポリイミドは 250℃～300℃で完全に硬化してしまうのでポリアミドからポリイミドに変化するまでの微妙な範囲で接合プロセスを行う必要がある。ポリイミドが完全に硬化した後ではウェーハ同士の接合に必要な接着の効果を得られないので、まず 200℃付近にてソフトベークを行い、完全硬化する前のアミド化を促した状態で接合のプロセスに移行する。この工程ではクリーンオープンを使うなどして、ウェーハを一定の温度に維持し、硬化を行うと同時にできる限り不要なガスを放出しておく必要がある。

④専用のジグを使って2枚のウェーハを精度良く重ね合わせ、機械的に固定する。その際ウェーハ上に形成したアライメントマークを用いて2枚のウェーハ間でデバイスと隔壁のパターン位置を合わせておく必要がある。片面について鏡面研磨したウェーハを使用することで、赤外線光によりウェーハの透過画像を表示することができる。ウェーハ上の2箇所位置合わせ用のアライメントマークを加工しておき、この赤外線透過画像を見ながら2枚のウェーハの相対的な位置を決めて仮に固定する。何らかの理由で前述のような赤外線透過による画像認識が行えない場合は、キャップ側ウェーハの裏面にアライメントマークを加工しておき、デバイス側ウェーハのアライメントマーク位置を画像として記憶しておき、キャップ側ウェーハを重ねてからシステム内で仮想的にアライメントマークの位置を合わせるという方法もある。キャップ側ウェーハの裏側にアライメントマークを加工しなければいけないため、その際の位置精度がアライメント精度に影響するため、一般的にあまり精度は高くない。

⑤機械的に固定した2枚のウェーハをジグに取り付けた状態で、接合専用の装置に装着する。装置は真空チャンバー機能を有しており、接合した界面に気泡ができることで接着が阻害されることを防ぐことができる。チャンバー内が一定の真空度になれば、2枚のウェーハを分け隔てているスペーサーを取り除くことで、ウェーハ同士が接触し接合の準備が完了する。その後ウェーハの上下からピストンで圧力を加え、250℃～300℃の温度で加熱し、一定時間保持することで永久接合を行なう。このプロセスには20～60kNの圧力、300℃以上の加熱を行うことができる装置で行う。

④の工程で2枚のウェーハを固定した状態では、ウェーハ同士は接触しておらず、単純に機械的に押さえることでずれないため、⑤で接合装置まで移動しセットするまでの過程でちょっとしたショックなどによりウェーハ同士がずれてしまう可能性が残る。

⑤の工程では真空を引いているため、機械的な固定状態を開放すれば理論的には上側のウェーハがずれることなく下側のウェーハに接触するが、装置の傾きなどを考慮すれば完璧なやり方ではないため、ウェーハ同士がずれる可能性がある。また樹脂の種類によって、特に熱可塑性の樹脂では、加熱中に流動性を持つため、いかに装置が垂直にウェーハに対して荷重を加えたとしても、ウェーハ自体や接着層の持つ傾きなどの要素からずれが生じてしまい、装置からのアプローチで解消するには限界がある。

4.2 近赤外線による局所的仮固定

図4.1は、赤外線の波長を示している。図に示されるように、電磁波における様々な波長域の中で0.75μm～1000μmまでが赤外線とされ、0.8μm～2.5μmの波長域が近赤外線と呼ばれ、対象物を加熱することができる。

様々な赤外線の波長域において、約 $1\mu\text{m}$ から $6\mu\text{m}$ についてはシリコンに対して高い透過性を持つことが一般的に知られており、半導体製造分野では外観検査装置などにそうした波長域の赤外線が多く使われている。

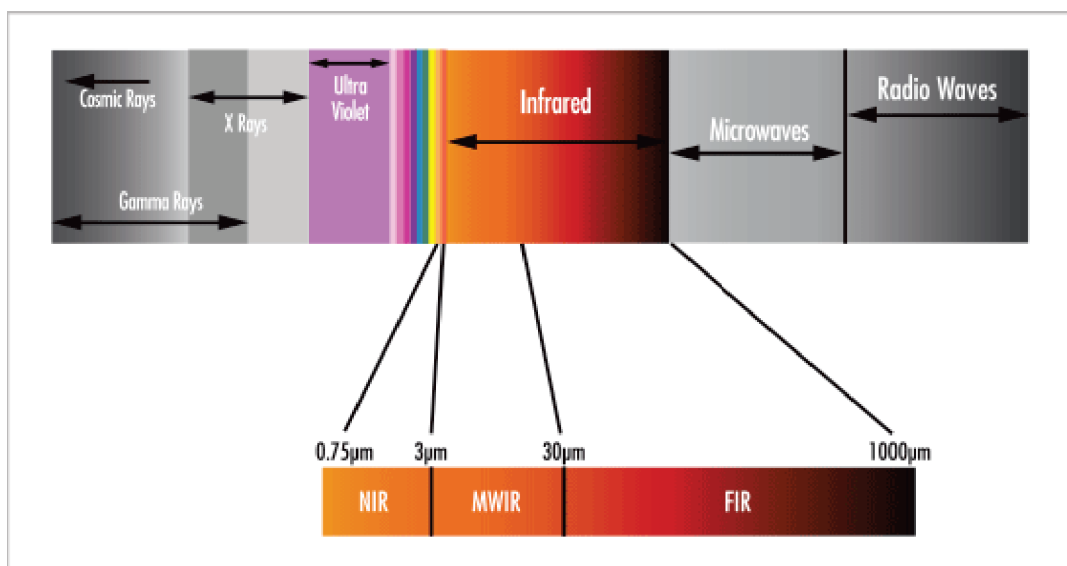


図 4.1 赤外線の波長

重ね合わせた 2 枚のウェーハの外側から近赤外線を照射すれば、シリコンを透過して内側の接着層のみを加熱することができる。このため、集束レーザーでの接合のように、透明基板を使用する必要が無く膨張係数の差によるヒステリシスの問題が起きない。また接着層を介して接着するのでウェーハそのものに表面研磨の前処理を行う必要がなく、接着剤が表面の凹凸を吸収するため、接着層同士を接触させるために一定の荷重で押し付ける必要はある。

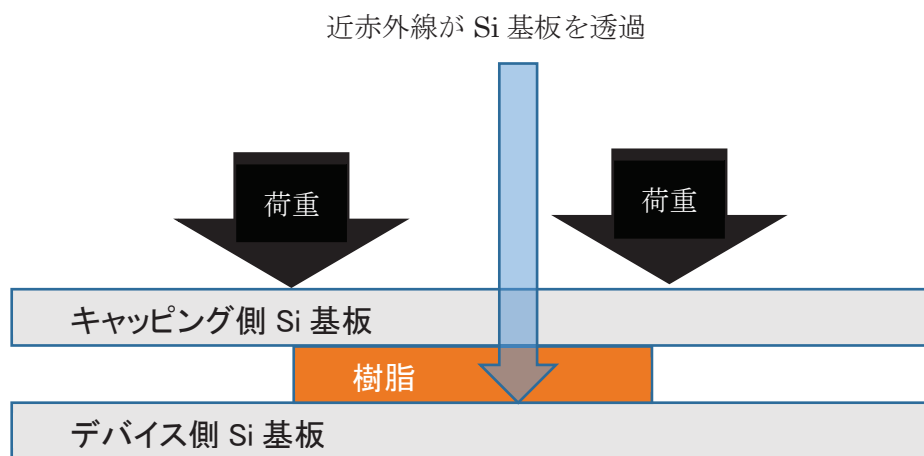


図 4.2 近赤外線による Si ウェーハを透過した内部の加熱

ポリイミドのような熱硬化性樹脂を使って 2 枚のウェーハを接合することで、高いアライメント精度を維持しながら強固にウェーハを接合することができるが、アライメントを行う装置と接合を行なう装置が異なるため、固定したウェーハセットを装置から装置に移動する際にアライメントがずれてしまう可能性があり、また作業は慎重に行う必要がある。前述のように工程の途中でスペーサーと取り除くが、その際にも若干アライメントがずれてしまう可能性もある。本研究では、2 枚のウェーハを重ねてアライメントを合わせた状態で、局部的に接合（仮固定）を行うことで後に荷重と熱が加わる本接合工程において仮固定時のアライメント精度が維持できるようなプロセスについて検証した。（図 4.2）また、市場で調達できる波長 $1.1 \mu\text{m}$ (1100 nm) のスポットヒーターと接着剤として熱硬化性樹脂のポリイミドを使って実験を行った。あくまでも仮固定なのでウェーハ基板上に形成された MEMS デバイスを保護するためには、更に熱と荷重を加えて本接合を行う必要があるので、BCB の熱可塑性樹脂は仮固定には不適合の可能性が高い。

4.3 局所的な仮固定の方法

赤外線を吸収する材料であれば樹脂以外に金属といった別の材質も検討できるが、材料コスト、プロセスの難易度、圧膜形成の可能性といった観点から熱硬化性樹脂のポリイミドを選択した。本節では、150 mm の Si ウェーハ 2 枚を使って、接合前と接合後のウェーハのずれを確認した。一方のウェーハは MEMS デバイスや SAW フィルター等の微小電子デバイスが形成されたものを想定している。また、形成された各デバイスを外部環境から隔離して酸化等による劣化を防ぐためのキャッピングウェーハと想定している。

図 4.3 は、仮固定を行うウェーハの準備を示している。基板の準備として、まずホットプレートに各ウェーハを乗せて脱水を行った。図 4.3(a)に示されるように、XY 方向でのアライメント精度を計測するため、2 枚の各ウェーハには

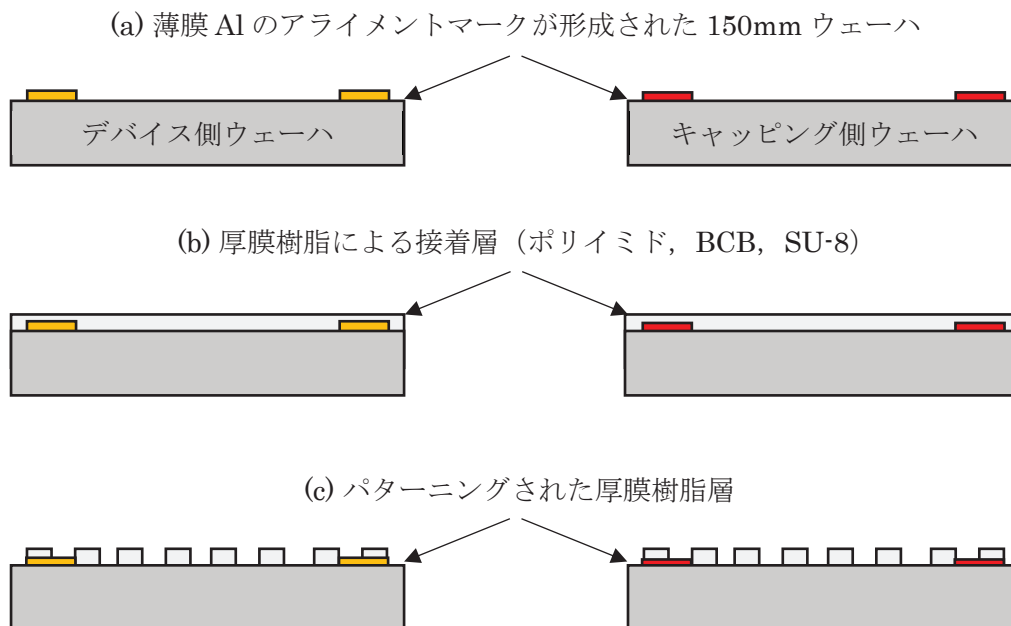


図 4.3 仮固定を行うウェーハの準備

(a) 薄膜 Al のアライメントマークが形成された 150mm ウェーハ

(b) 厚膜樹脂による接着層 (ポリイミド, BCB, SU-8)

(c) パターニングされた厚膜樹脂層

Al 薄膜を用いたアライメントマークを別工程にて形成した。図 4.3(b)では、次の工程でフォトリソグラフィによるパターンニングが可能なよう樹脂（ポリイミド、SU-8、BCB）のコーティングを全面に行った。コーティングした樹脂は後に接着剤として利用するため、完全硬化はさせずにパターンニングができるようソフトベークを行って、適度に硬化させておいた。図 4.3(c)では、ソフトベーク後の樹脂表面には感光性レジストを塗布し、フォトリソグラフィ工程にてフォトマスク上に形成された格子状のパターンを転写し、エッチングを行うことで樹脂層を幅が $250\ \mu\text{m}$ の格子状に加工した。本研究においてウェーハ上の樹脂が除去されたブランクのエリアは本来デバイスが形成される部分となる。今回はキャッピング側のウェーハにも同様に樹脂をコーティングし、パターンニングを行ったが、これはデバイス側のウェーハと合わせて樹脂層の厚みを増やす目的で行った。

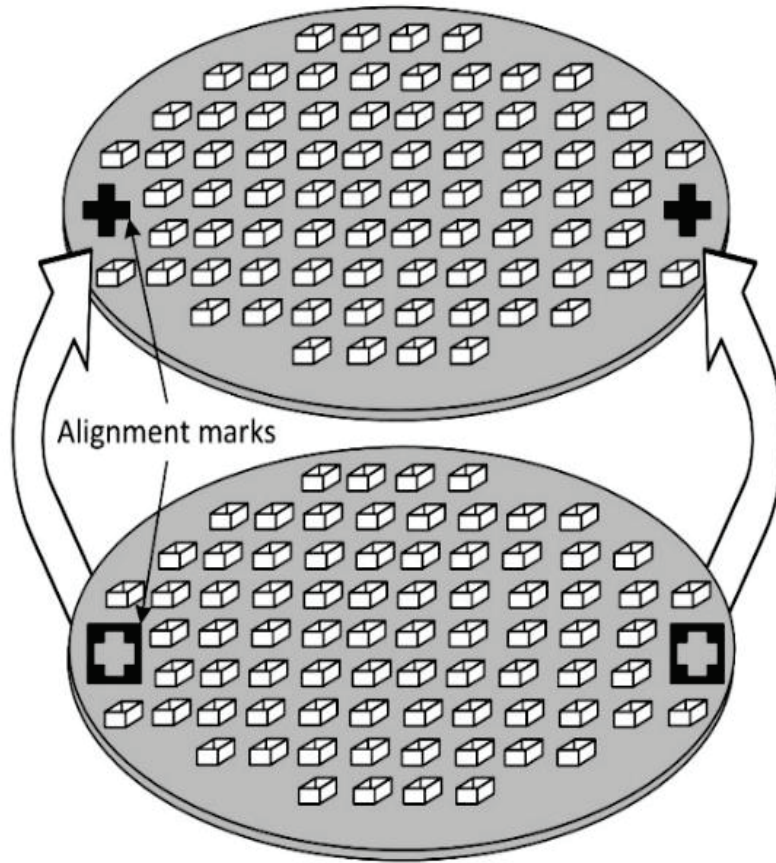


図 4.4 2 枚のウェーハを重ねて位置合わせを行なう

次にこの2枚のウェーハについて、一般的なウェーハアライナーを使って Al にて形成済みのアライメントマーク部分について位置合わせを行なった。(図 4.4) これらのアライメントマークは2枚のウェーハを重ね合わせた際、互いに内側を向くため外側からはその位置を確認することができない。一方で、Si を透過する波長を持った IR 光を用いて透過画像をライブ画像で直接確認しながらアライメントを行うので、仮貼り合せ前のアライメント精度は極めて高く、また位置合わせの操作も容易で、複雑な機器を必要としない。様々な材料において、赤外線透過率は異なるが、Si ウェーハは 1000 nm 付近から急激に透過し始め、1100 nm 近傍でほぼ飽和する(図 4.5 様々な材料における赤外線透過率)。

また、ウェーハの種類によっても変化するが、ほぼ±数十 nm の範囲に収まることがわかっているので、Si の透過像を見るためには、1100 nm 以上の波長

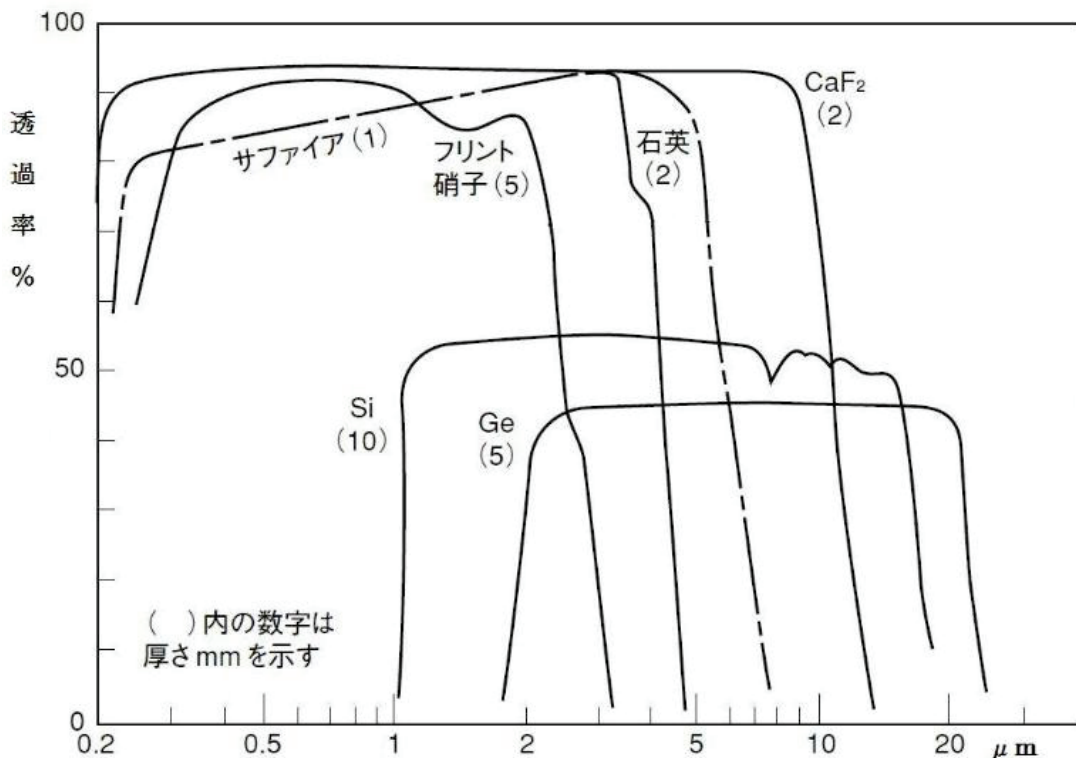


図 4.5 様々な材料における赤外線透過率

で照射すればよいことが分かる．言い換えれば，位置合わせを行なうための IR 光は透過さえすれば良いので，波長の選択は比較的自由度が高い．Si ウェーハの表面粗さが大きい場合，IR 光が拡散して透過画像が鮮明に映らないため，本研究に用いた各ウェーハは IR 光の拡散を防ぐため両面について鏡面研磨したものを使用した．

2 枚のウェーハについてアライメントマーク部分について位置合わせが完了して機械的に固定された状態で，完全硬化する前の状態の樹脂の 3 カ所に対して，近赤外線照射して所定の温度まで加熱することで仮固定を行なった（図 4.6 局所的な仮固定の概略図）．

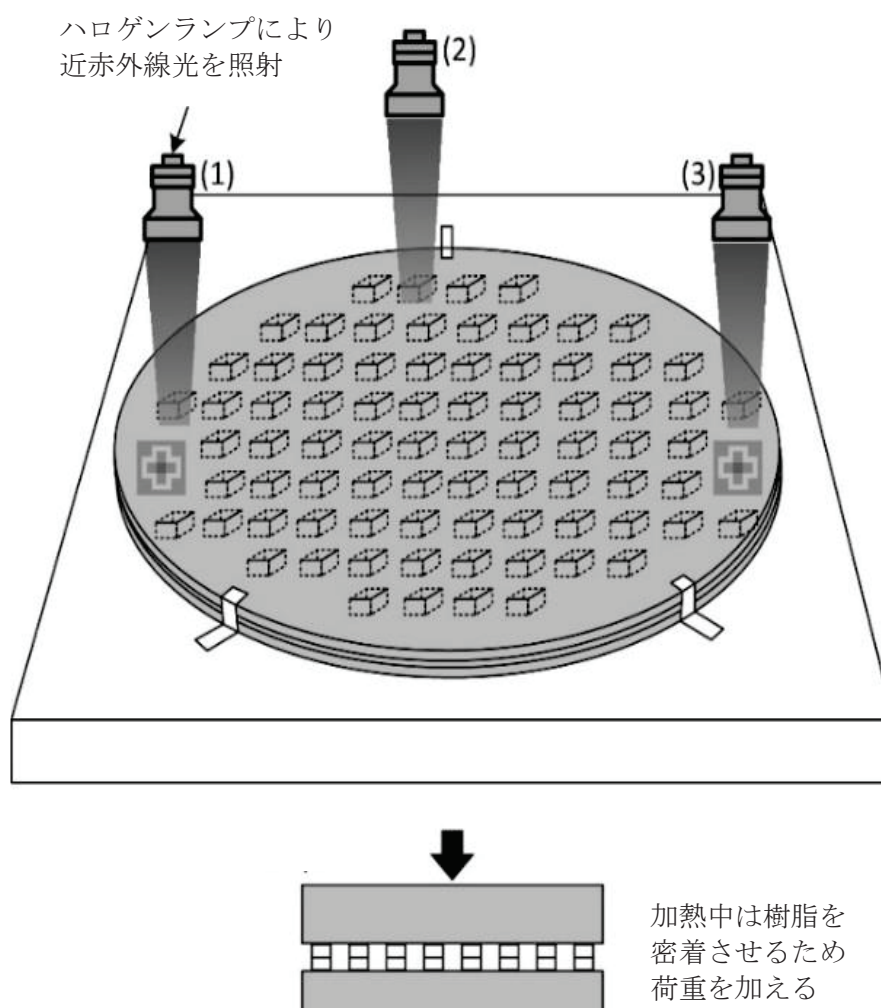


図 4.6 局所的な仮固定の概略図

4.4 実験機系

図 4.7 は、近赤外線照射に用いた装置の詳細を示している。これは市販のものではなく学内で製作したもので、2枚組のウェーハを固定するホルダー部分、近赤外線を照射するハロゲンランプ、ハロゲンランプの破損を防ぐために冷却するためのチラー、照射時間やパワーを制御するコントローラーにより構

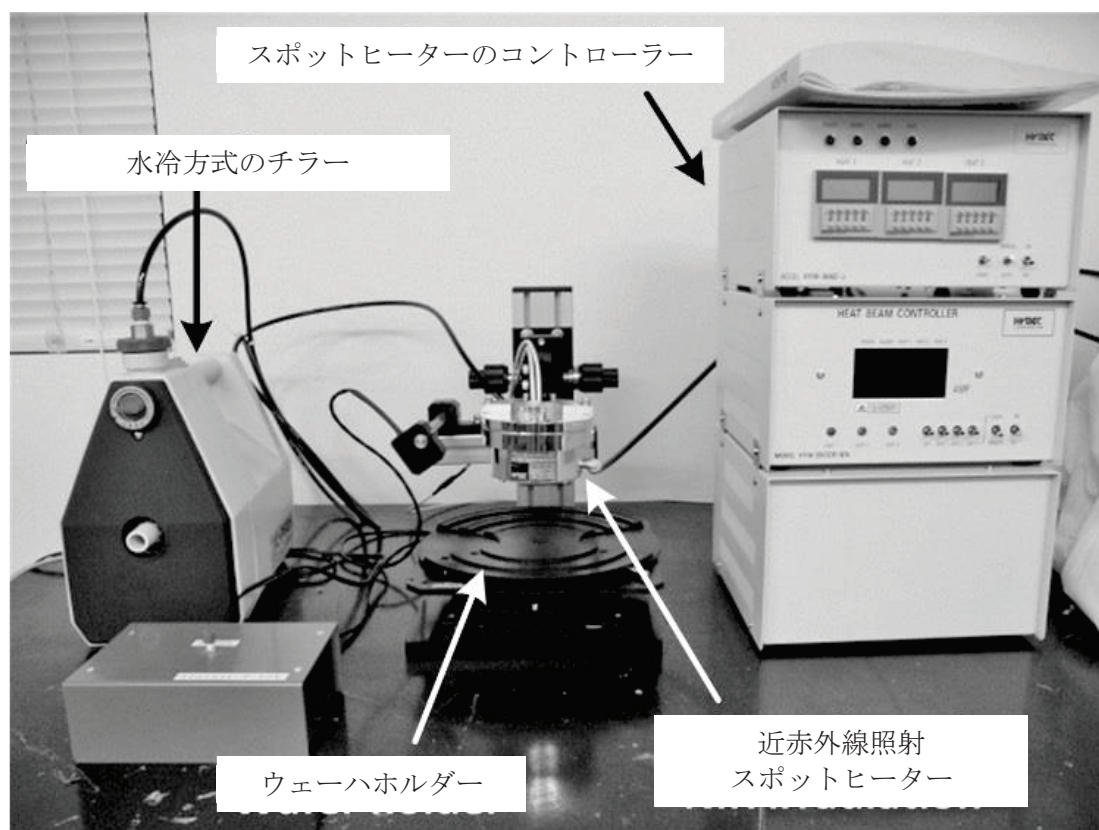


図 4.7 近赤外線を用いた仮貼り合わせ装置

成される。

ハロゲンランプは集光タイプのもので、スポット径 2 mm 程度の範囲に限定して過熱することができるため、ウェーハ上の樹脂の一部を加熱するには十分な性能を有する。

BCB, ポリイミドについては, コントローラーにより照射時間を 90 秒に設定した. また照射光の強度についても, 与える電流をコントローラーによって制御することで変化させることができる. ハロゲンランプにより照射される光の波長の中央値は 1020 nm で, 電流値を 14 A にすることで実現できた. 本研究における全ての実験においてこの電流値を採用した.

先述の通り通常このハロゲン光のスポット径は 2 mm 程度まで絞ることができるが, 対象物までの距離に影響を受けるので本研究では上面のウェーハから 30 mm の位置に光源を固定して使用した.

組み合わせられた 2 枚のウェーハのアライメント精度を維持するために, 複数箇所について仮固定を行う必要があり, 本研究では外周に近い部分の 3 箇所近赤外線照射して, 樹脂を加熱することで固定することとした.

ウェーハを固定するホルダー部分は回転する機構を有するため, まず 1 点目に所定の時間近赤外線照射が終われば, 約 60 度回転させてから同様に照射し, 最後に再び 60 度回転させて照射することで, 3 点についての加熱処理が完了する.

先述の通り 1000 nm 付近から Si において赤外線の透過率が高くなるため, 照射された近赤外線は Si ウェーハを加熱せずに透過し, 接着層である内側の樹脂部分を直接加熱することができる.

こうして近赤外線により加熱された 3 箇所の樹脂部分は, 次に行われる永久接合工程において, 上下から加えられる荷重によって生じるせん断方向の応力により, 2 枚のウェーハがずれないようにする, アンカーとしての効果が期待される.

ハロゲンランプに 14 A の電流を与えると, ランプの温度は 2846K にも達するため, 実験中は図 4.7 に示す水冷方式のチラーにより水を循環させることで連続的に冷却する必要がある.

図 4.8 は、図 4.8 近赤外線を照射したときの照射時間と温度上昇の関係を示している。ハロゲンランプによる照射時間と電流値の設定に際しては、各樹脂の温度と硬度に関する調査結果を参考にした。ハロゲンランプの照射によって起きる、上部ウェーハと下部ウェーハの表面温度に関するプロファイルを図に示す。上部ウェーハの表面に取り付けた熱電対の温度が T_t 、下部ウェーハの表面に取り付けた熱電対の温度が T_b でプロットされている。各熱電対が、照射時間 15 秒を越えたあたりで、 T_t =約 930°C、 T_b =約 560°Cに達した事から適切な照射時間と判断した。

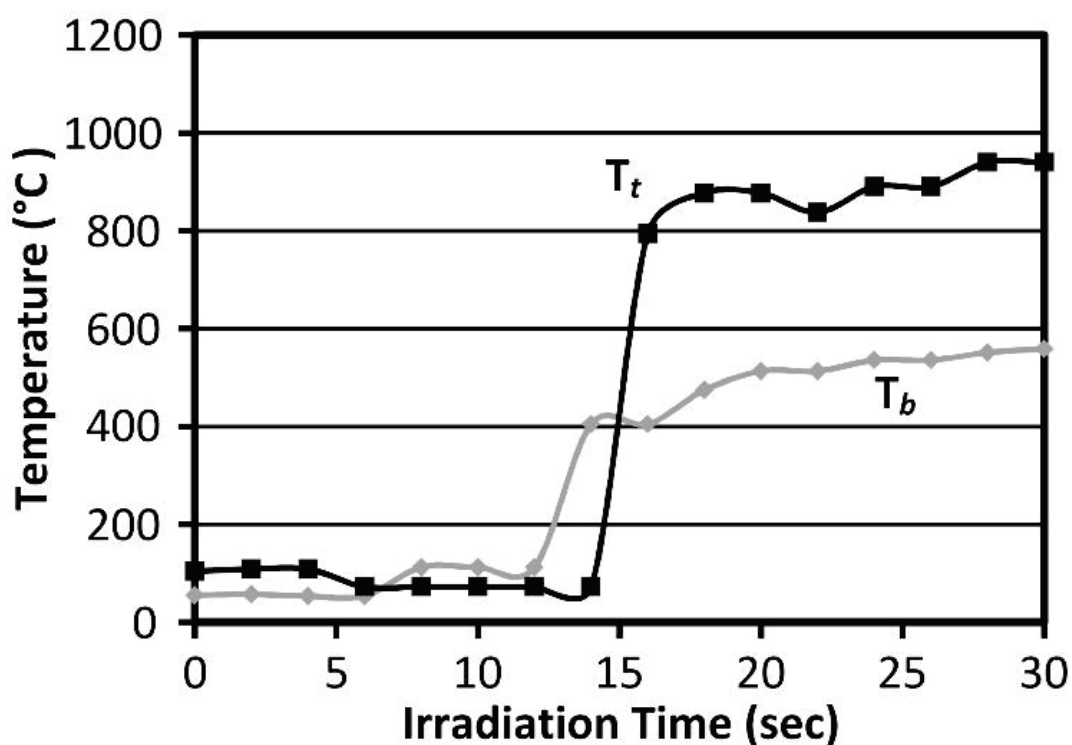


図 4.8 近赤外線を照射したときの照射時間と温度上昇の関係

こうして位置合わせ後に仮固定が完了した 2 枚組みのウェーハについては、一般的に市場で流通して実績のある専用の装置（山中ヒューテック社製、Ys400CTH を使用）を使って、所定の熱と荷重を加えることで永久貼り合せを行う。

一般的に接着層として樹脂を用いた場合のウェーハ接合では、150 mm のウェーハに対し上下から 14.7kN の荷重をかけた状態で、350°Cまで昇温した後 15 分間保持する。

4.5 アライメント精度の検証（ポリイミド）

本研究では仮固定による効果を検証する目的で、感光性ポリイミド、BCB、SU-8 を使って実験を行った。

ポリイミドは半導体のパッケージ分野では既に多くの実績があるだけでなく、半導体に求められる多くの材料物性において適合する点が多いことから、MEMS や SAW フィルターといった微小電子デバイスへの適用についても研究開発が行われており、今回の検証でもパターニングを考慮して感光性ポリイミドを選択した。

実験では接着層の厚みによるアライメント精度への影響を確認するため、コーティング層の厚みが $10\ \mu\text{m}$, $20\ \mu\text{m}$, $30\ \mu\text{m}$ のものを用意した。これはそれぞれのウェーハの片面に $5\ \mu\text{m}$, $10\ \mu\text{m}$, $15\ \mu\text{m}$ の厚みでコーティングを行うことで、重ね合わせた際に前述の厚みとなり、同時に実際の MEMS デバイスが形成された状態でのウェーハ接合をシミュレートすることができると考えた。フォトリソグラフィプロセスにて、ポリイミド層にパターニングを行った後、硬

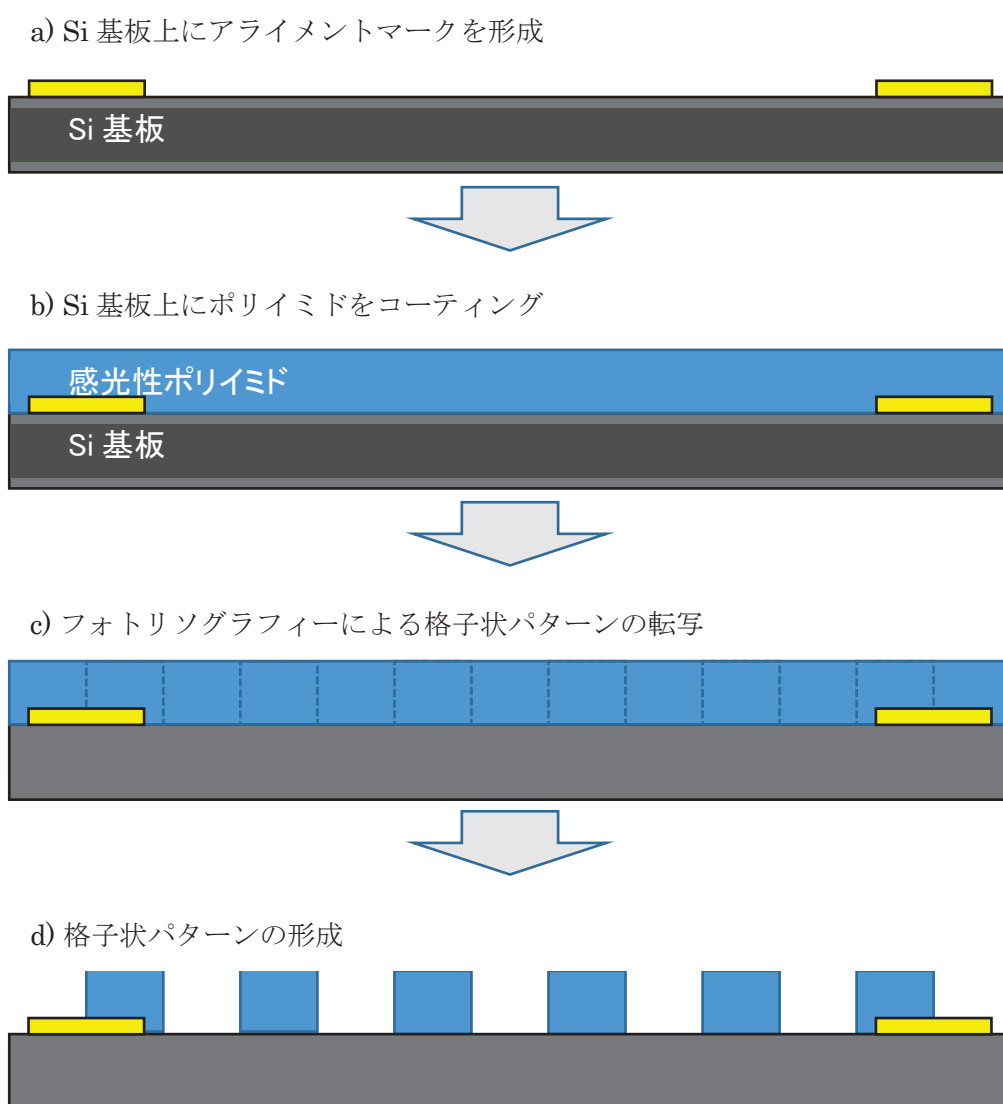


図 4.9 Si ウェーハへの樹脂層形成の流れ

化させるため 250°Cにて 30 分間ポストバークを行った。通常ポリイミドを完全硬化させるには 300°C近くまで加熱する必要がある。ただし、完全硬化した後では接着効果が期待できないため、仮貼り合せ工程、永久貼り合せ工程における材料の接着効果を期待する目的でポストバーク温度は 250°Cに設定した（図 4.9 Si ウェーハへの樹脂層形成の流れ）。

前章で記述した通り、ハロゲンランプによる近赤外線スポット照射にて、ウェーハ上の 3 箇所について局所的に接合を行ない、専用装置内での荷重をかけた状態で過熱することによりウェーハ全面について永久接合が行われる。

永久接合前に行った局所的な接合の効果は、アライメント精度の高さによって確認することができる。重ね合わせた 2 枚のウェーハのアライメントは、専用装置内で荷重をかけた際にせん断方向の応力により大きくずれるので、永久貼り合せ工程が完了した後に、測長機能のある IR 顕微鏡にてそれぞれのアライメントマークのずれを観察した。

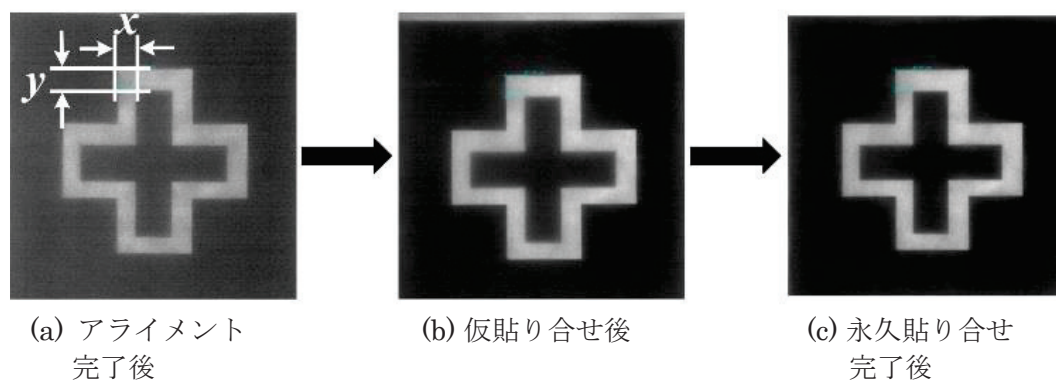


図 4.10 仮固定後のアライメントマーク
(a)アライメント完了後： x_1, y_1 (b)仮貼り合せ後： x_2, y_2 (c)永久貼り合せ完了後： x_3, y_3

アライメントマークは金属で形成されており、IR 光で簡単に透過できるためライブ映像を観察しながら図 4.10 仮固定後のアライメントマークに示される x , y の部分について測定を行う (図 4.10) .

アライメントが完了した時点で 2 枚のウェーハは機械的に固定されている。このときのずれをエラーとして拾ってしまわないよう、図 4.10 に示すとおり x_1 , y_1 として測定する。次に局所的に仮貼り合せが完了した状態で、図 4.10 に示すとおり x_2 , y_2 を測定しこの時点でアライメントのずれが生じていないか確認する。最後に永久貼り合せが完了した状態で図 4.10 に示す通り x_3 , y_3 として測定することで各プロセスに起因するウェーハのずれ状態が把握できる。

樹脂層の厚みが $20\ \mu\text{m}$ の Si 基板について測定したところ、アライメント完了後が $x_1=50.5\ \mu\text{m}$, $y_1=56.8\ \mu\text{m}$, 仮固定完了後が $x_2=51.3\ \mu\text{m}$, $y_2=56.3\ \mu\text{m}$, 永久貼り合せ完了後が $x_3=46.6\ \mu\text{m}$, $y_3=59.2\ \mu\text{m}$ という結果となった。

この図 4.10 仮固定後のアライメントマークで x , y と示されるアライメントマーク間の隙間は設計上 $50\ \mu\text{m}$ としてある。局所的な仮固定を行う前の段階では、ピンセットを使ってウェーハを扱ったため、 x_2 , y_2 の長さを測定することで局所的な仮固定が完了するまでの工程で発生する、取り扱いに起因したアライメントのずれが発生を確認した。計測結果では x_1 , x_2 の差, y_1 , y_2 の差がそれぞれ $1\ \mu\text{m}$ 以下となっているので、ウェーハの取り扱いに起因するアライメントのずれは設計寸法に比べて十分に小さいということが言える。従って、 x_3 , y_3 の計測結果に現れた、永久接合後に確認できるウェーハ間のアライメントのずれは、永久接合時のプロセスに起因しており、最も重要なのは x_1 と x_3 の差および y_1 と y_3 の差であるということが結論付けられる。

仮固定	有り	無し	有り	無し	有り	無し
樹脂厚	10 μm		20 μm		30 μm	
アライメント後						
永久接合時						

図 4.11 局所的に仮固定を行った場合と、行わなかった場合のアライメントマークのずれ

本研究においては、厚膜ポリイミドという樹脂材料を使ったウェーハ貼り合せ技術において、初期のアライメント精度に対し永久貼り合せ後のずれを 5 μm 以内に納めることができたので、我々が行った局所的な仮固定技術は、ウェーハ接合におけるアライメント精度を維持するという目的で、十分に効果のある方式であると考え（図 4.11）。

更に本研究では、局所的な仮固定を行った場合と、行わなかった場合とでのアライメント精度の違いを確認するため、仮固定の工程を行わずに永久接合を



図 4.12 局所的に仮固定を行わずに永久接合を行なった際のアライメントのずれ

行った結果についても実験した。ポリイミド樹脂について同様の条件で用意した 2 枚のウェーハについて、局所的な仮固定を行わずに永久接合を行ったところ、実際のデバイス製造工程においては製造不良となる可能性が非常に高い、大きなアライメントのずれを観察した。（図 4.12）

比較のためにポリイミドによる接着層の厚みが、10 μm 、20 μm 、30 μm のウェーハについて、局所的な仮固定を行わずに永久接合を行ない、その結果を表にまとめた。

更に、ポリイミドの接着層の厚みに対する $\Delta x (=x_3-x_1)$ と $\Delta y (=y_3-y_1)$ の値との関係を図に示した。局所的に仮固定を行った場合の結果を下段、仮固定を行わなかった場合の結果を上段にプロットしたが、ポリイミドの接着層が 20 μm 、30 μm のウェーハに関しては、局所的に仮固定を行わないで永久接合を行った場合のアライメントのずれが、測定範囲である 50 μm を超えていたので除外し

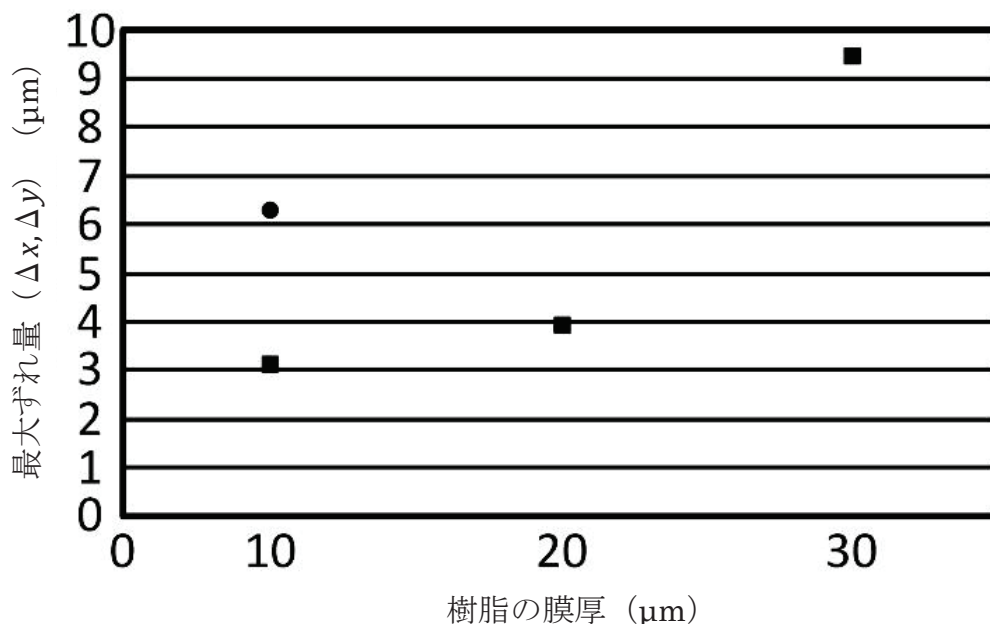


図 4.13 樹脂接着層の厚みとアライメントずれの関係

た。これらの結果から、接着層の厚みが厚くなるほど本研究で述べている局所的な仮固定の効果は大きくなることが分かった（図 4.13）。

4.6 アライメント精度の検証（BCB, SU-8）

4.6.1 BCB

永久接合の材料として、熱可塑性樹脂である BCB についても実験を行った。BCB は半導体デバイスのパッケージング材料として応用されていることが既に発表されており特に RFMEMS スイッチ分野で脚光を浴びている [91]-[93]。

接着層としての BCB の膜厚に関する条件以外は、熱処理の温度や時間、近赤外線照射する条件、フォトリソグラフィによって転写する接着層のパターン、永久接合時の荷重や熱などは、ポリイミドで実験を行なった際と同じにして実験を行った。BCB については膜厚 20 μm のものについてのみ、近赤外線による局所的な仮固定の効果調べた。

結果として近赤外線による局所的な仮固定を行ったウェーハについては、荷重をかけた永久接合後のアライメント精度が 5 μm 以下となった一方で、近赤外線による局所的な仮固定を行わなかった場合は、マークのずれが大きく測定範囲を超えてしまった。

このことから、BCB のような熱可塑性樹脂を使ったウェーハ接合においても、近赤外線による局所的な仮固定の効果は十分に期待できることが分かった。

4.6.2 SU-8

ポリイミド、BCB に加えて、ウェーハ接合の分野で注目される樹脂材料の一つに SU-8 がある [94] [95]。

SU-8 には SU-8 2, SU-8 5, SU-8 8, SU-8 10, SU-8 25, SU-8 50 といった複数の製品ラインナップがあり、通常は末尾の数字が形成可能な膜の厚みを示している。

SU-8 はスピコーティングを使って圧膜を形成することが可能なため、ウェーハ上にアスペクト比の高い構造体を作るための鋳型として用いることができる [96] . またマイクロ流体デバイスを形成する材料としても広く用いられている.

今回の実験では 1 回のコーティングで 100 μm の膜厚を形成できる Micro Chem 社の SU-8 3000 という製品を接着層の材料として使用した.

各ウェーハの片面に SU-8 を 50 μm の膜厚となるようスピコーティングで形成し, 2 枚のウェーハを重ね合わせて 100 μm として永久接合プロセスを行なった際のウェーハのずれと, 近赤外線照射による局所的な仮固定の効果を検証した.

SU-8 がコーティングされたウェーハに, ポリイミド, BCB に行ったのと同じ格子状のパターンをフォトリソグラフィーにて形成し, 120 $^{\circ}\text{C}$ にて熱処理を行って硬化した.

近赤外線による局所的な仮固定においては, SU-8 のガラス転移温度が 200 $^{\circ}\text{C}$ と低いため, 照射時間を 15 秒とした. これはポリイミドや BCB に対しては比較的短い照射時間だが, SU-8 を接着材料として使用する際には十分であると考えた.

アライメント精度を測定するために, 図 4.14 に示す通り各ウェーハに十字型のアライメントキーを形成して P1, P2 部分のずれを計測した. 結果として局所的な仮固定を行った場合のアライメントのずれは 5 μm 以下となり機械的に固定した状態のアライメント精度を維持することができた. また局所的な仮固定を行わなかった場合はアライメントのずれが大きく, 機械的に仮固定した状態のアライメント精度を維持することができなかった.

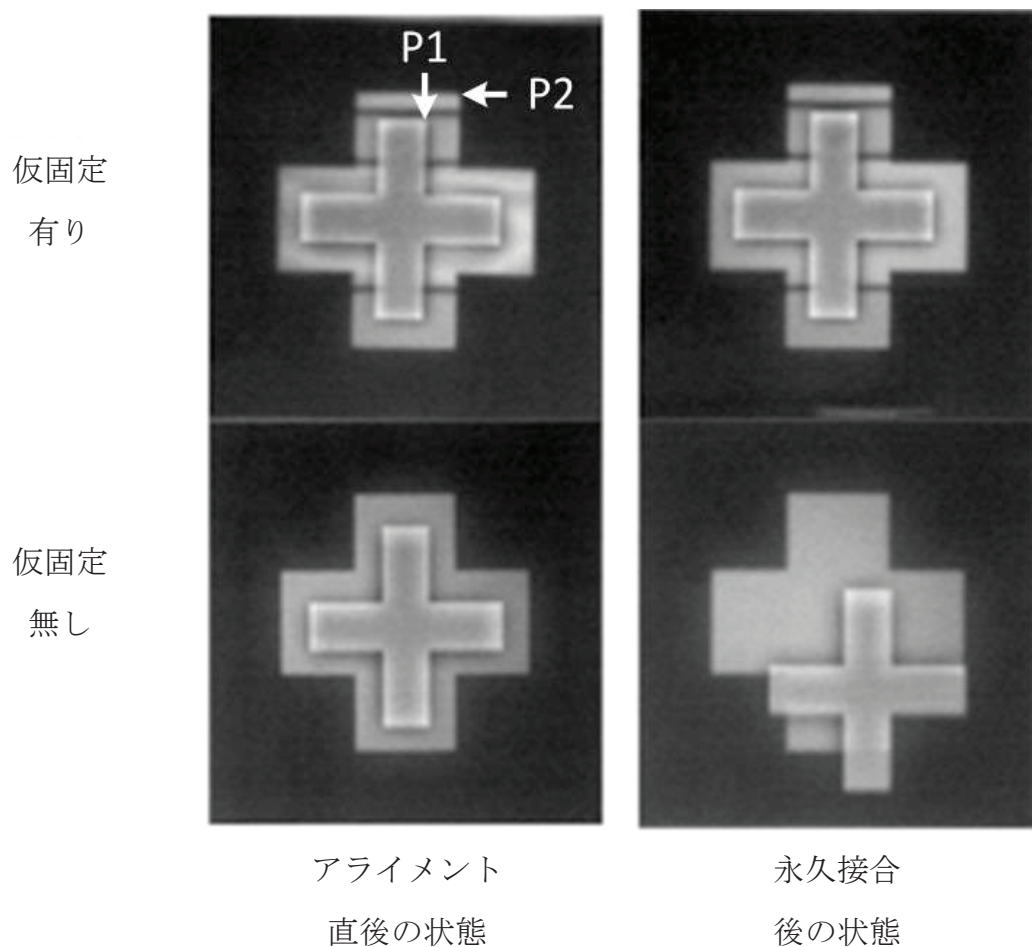


図 4.14 SU-8 上に形成したアライメントマークが局所的に仮固定した場合と仮固定しなかった場合とでアライメントのずれが異なる様子

本研究ではアライメントのずれを観察するために Al の薄膜をアライメントキーとして形成したが、接着層に使用したものと同一樹脂上に、フォトリソグラフィプロセスにてアライメントキーのパターンを形成することで、ウェーハのずれを観察することも可能と考える。実際のデバイス製造においては、このアライメントキー部分を局所的な仮固定に必要なアンカーとしても機能することが期待できると考え、その場合は仮固定に使用する部分を省くことでデバイスを形成する部分の面積をより多く確保することができ、ウェーハの有効面積が広くなることから、製造コストを下げる効果もある。

本研究での全体的な結果から考えると、ポリイミド、BCB、SU-8 に代表される樹脂接着材料を使った局所的な仮固定方法は、機械的に固定した際のアライメント状態を、荷重と熱を加えながら行う永久接合後まで維持するという目的に対して効果的であることがいえる。

この局所的な仮固定方法については様々な点において、将来的に完全が必要である。各材料のプロセスウィンドウについてはまだ不明な点が多いため、様々な樹脂接着材料における接着層の厚み、硬化させるための熱処理の温度、仮固定時の荷重、近赤外線照射時間などパラメーターについては最適化が必要である。

4.7 商業ベースの装置開発

Si 基板を透過する赤外線光を使って，CCD カメラにてウェーハ上のアライメントマークを，ライブ画像を見ながら複数ウェーハ間の位置合わせを行なうアライナーの機能と，ハロゲンスポットヒーターにて近赤外線を照射して局所的な仮固定が行える機能を，1 台で実現する装置がシグマ光機様，菱光社様による共同開発で製作され，セミコンジャパンにて展示された（図 4.15）。

この装置を使ってウェーハ間の位置合わせと，局所的な仮固定を連続して行えば，その後のプロセスにおいてウェーハずれの心配が少ない。



図 4.15 ウェーハの位置合わせと局所的な仮固定が行える装置

また仮固定後に続く永久接合のプロセスにおいて、メーカー独自の固定ジグなど固定した状態で接合装置に搬送する必要が無い場合、メーカーや機種への依存が低いので、MEMS デバイスの製造元は接合装置を自由に選ぶことができる。また荷重をかけた際のせん断応力によるウェーハのずれを気にしなくて済むので、ウェーハをセットするステージと荷重を加えるピストンの平行度といった装置精度に対する要求性能も低い。

第5章 接合したデバイスの引張り試験

5.1 接合強度の確認方法

局所的な仮固定の効果を図る目的と、永久接合における樹脂接合の適合性を図る目的で、ポリイミド樹脂を使って貼り合せた基板の引っ張り強度について検証を行った。

ウェーハとウェーハを全面で接合した場合の強度を計測する方法には、接合したウェーハの接合界面に薄いかみそりの刃を挿入して、剥がれた部分の長さを測る「ブレード法」などもあるが、本研究では2 cm 角のシリコン基板およびガラス基板の組み合わせを複数準備し、それぞれの試料を接合後、両面に試験片について接着剤を使って固定し、引っ張り試験機にて接合強度を測定した。

(図 5.1 引っ張り強度試験を行うための試験片準備)

各基板には熱硬化性のポリイミド (Q-IP-X1313) を塗布し、熱と荷重を加えながら永久接合をおこなった。

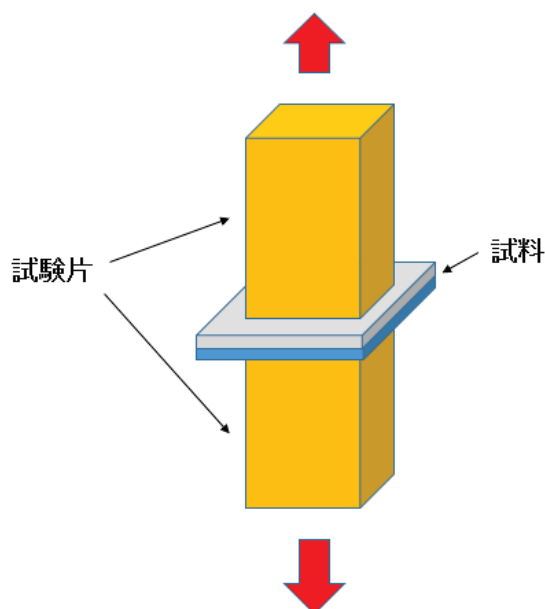


図 5.1 引っ張り強度試験を行うための試験片準備

先述の通り，接合時のパラメーターについては今後最適化する必要はあるが，本研究では錘により接合時の荷重を一定とし，加熱温度，基板の種類，組み合わせを変えて実験を行い接合強度の比較を行った。

5.2 試験サンプルの準備

スクリーン印刷を用いて各基板の上にポリイミド樹脂のパターンを厚さ約 $10\ \mu\text{m}$ で形成した。接合する基板はシリコンとガラスを組み合わせるので，シリコン+ガラス，シリコン+シリコン，ガラス+ガラスの各組み合わせで検証した。パターンニングが完了した際のポリイミドを図 5.2 に示す。

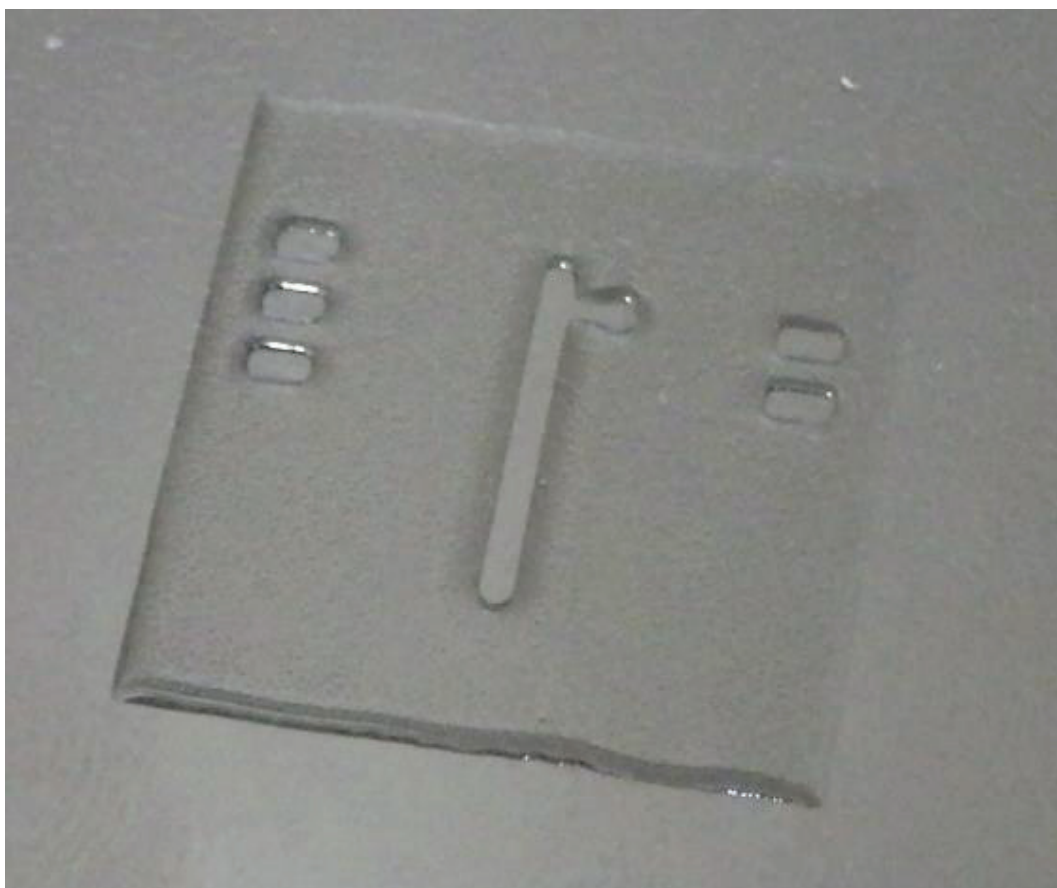


図 5.2 2cm 角のガラス基板上にポリイミド樹脂をスクリーン印刷にてパターンニングした状態

その後仮固定の際に行ったのと同じように、ホットプレート上に基板を置いてプリバークを行うことで硬化させる。前述のようにポリイミドは完全硬化した状態では非常に安定しているため、接合材料としてのアンカー効果を期待できないため、形状が維持できる程度に硬化するよう温度を低くした。

ポリイミドのパターニングを行なった後に 120℃で 60 分加熱し硬化させる。その後各基板を接合、およそ 500 g の重り (125g/cm²) をのせて 30 分加熱し接合を行った。その時の接合温度は 120℃, 180℃および 240℃と 3 種類の異なる条件に設定して実験を行った。

作製したサンプルの条件を以下の表 5.1 にまとめる。

表 5.1 作製した各サンプルの条件

サンプル	パターン面	貼り付け面	接合温度
1	シリコン	ガラス	120℃
2	シリコン	シリコン	120℃
3	ガラス	ガラス	120℃
4	シリコン	ガラス	180℃
5	シリコン	シリコン	180℃
6	ガラス	ガラス	180℃
7	シリコン	ガラス	240℃
8	シリコン	シリコン	240℃
9	ガラス	ガラス	240℃

5.3 試験方法と条件

試験には卓上型万能強度試験機 島津製作所 (株) AG-1 5kN を使用した。試験条件を表 5.2 に示す。

表 5.2 強度試験条件

試験モード	試験種類	コントロール	試験速度 (mm/sec)	伸び原点	破断, リミット後の動作	感度:
シングル	引張	ストローク	10	最初から	ストップ	50

接合が完了した基板を垂直方向に引っ張るため、引っ張り試験機に固定するための試験片を取り付けた。

この状態で接合面に対し垂直方向の力を試験片に加え、基板の接合界面が破断する時の最大引張強度を記録した。引っ張り試験機に試験片を取り付けた状態の様子を図 5.3 に示す。

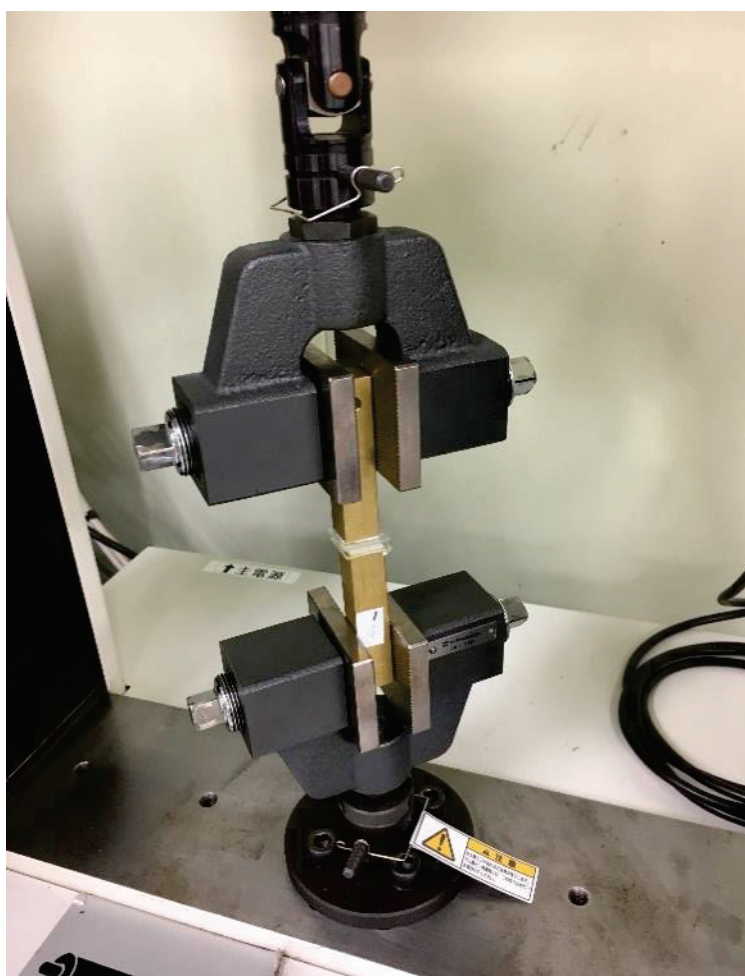


図 5.3 引っ張り試験機に試験片を取り付けた状態

5.4 強度試験の結果

温度 120℃で接合した基板については、シリコン、ガラスいずれの組み合わせについても接合強度が不十分であったため試験片や試験機に取り付ける際に剥がれてしまった。

残りの 180℃、240℃で接合を行った基板は、前述のように引っ張り試験機に取り付ける際にも問題が無く、想定どおりの試験が行なえたので試験結果を表 5.3 と図 5.4 に示す。

傾向として、高い温度で永久接合を行ったほうが接合強度は高い値を示した。また基板はガラスとシリコンの組み合わせは最も強度が高いことが分かる。

(表 5.3 引っ張り試験における強度試験結果 (kgf/mm))

表 5.3 引っ張り試験における強度試験結果 (kgf/mm)

	180℃	180℃	240℃	240℃
Gl-Gl	0.264	0.450	1.145	0.529
Si-Gl	1.257	1.098	1.575	1.630
Si-Si	0.566	0.690	1.195	1.123

また材質による接合強度の違いについては、ガラス基板同士の接合組み合わせは他の組み合わせに比べると最も強度が低く、シリコン基板とガラス基板の接合組み合わせ最も高い強度を示した。

しかしながら、ガラスとポリイミドの界面で破断が起きているのか、ポリイミド内で破断がおきているのか、もしくはシリコンとポリイミドの界面で破断が起きているのかはこの実験で結論付けるのが難しく、更に実験を重ねて検証する必要があると考える。

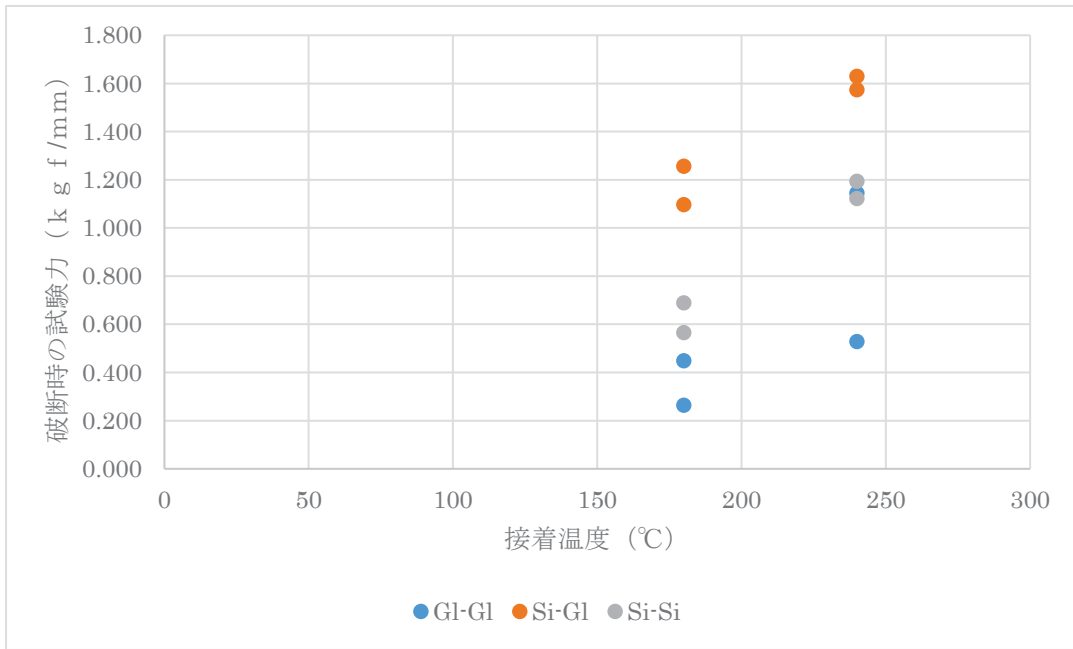


図 5.4 引っ張り強度試験結果

第6章 デバイスへの応用

6.1 マイクロ流体デバイスの試作

マイクロ流体デバイスの作成においては、Si の基板にデバイス構造と流路を作成し、電極を保護する目的で蓋としてガラス基板を貼りあわせる。その際一般的には陽極接合が用いられるが、接合プロセスの際ガラス基板上生じる凹みにより、デバイス性能が損なわれる可能性がある。そこで本研究では、新しい試みとして、スクリーン印刷技術を使ってポリイミドにて流路を形成し、更にその層を接着層として応用することで、Si 基板とガラス基板を接合する方法を検討した。

ポリイミドを用いたマイクロ流体デバイスの作成は他にも報告はあるが、[97]工程が複雑なため特定のデバイス構造にしか応用できないというデメリットがあった為、本研究では様々なデバイス構造に応用することが可能な、簡単に低コストの製造方法を検証した。

通常流路構造の作成と接着層の形成はそれぞれ別の工程で行うが、流路構造をポリイミドで作成し、その層を同時に接着層として使用することで工程数を削減することができることが最も大きなメリットと考える。

6.2 デバイス製造工程

本研究において検証したポリイミドを接着材料として使用する技術の、実デバイスに対する適用の可能性を検証するため、マイクロ流体デバイスによる pH センサーを作成した。

デバイスは3つの層で構成される (図 6.1(a), 6.1(b)) .

1つ目の層は pH を検出するための電極が形成された Si 基板で、作用電極として IrO_2 、対極に Pt、基準電極として Ag/AgCl を用いて形成した (図 6.1(c)) .

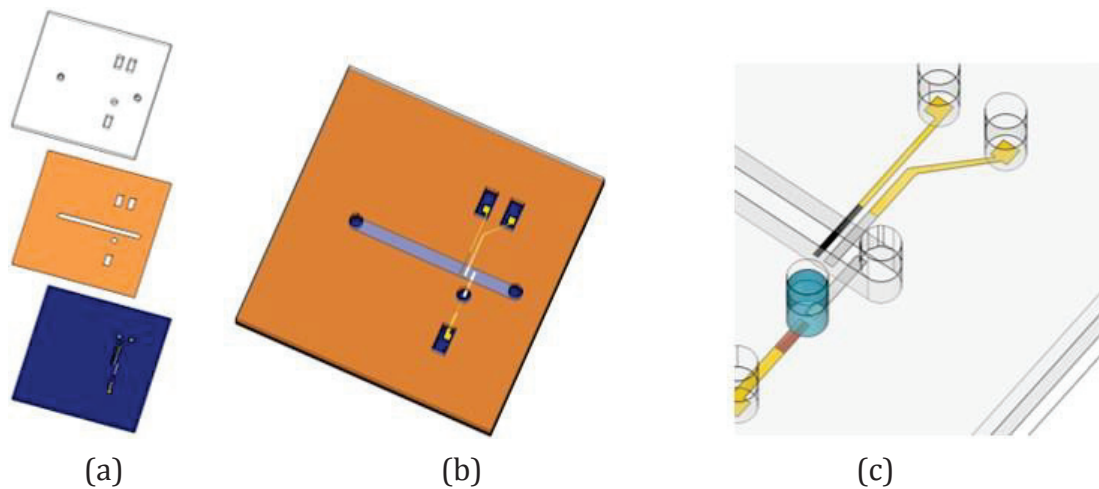


図 6.1 pH センサーを内蔵したマイクロ流体デバイスの構造
 (a) Si 基板, ポリイミド層, ガラス基板の 3 層構造
 (b) マイクロ流体デバイスの外観
 (c) pH センサーとしての電極構成

この Si 基板の上にスクリーン印刷技術を用いて流路となるチャンネルのパターンをポリイミドにて形成し、このポリイミドの層が接着層としても機能することを期待している。

デバイス基板は以下の工程で作成した。

(1) 熱酸化膜を形成した Si 基板の上にスパッタリングにて電極となる金属層を形成し、リフトオフプロセスを行う (図 6.2(a)) .

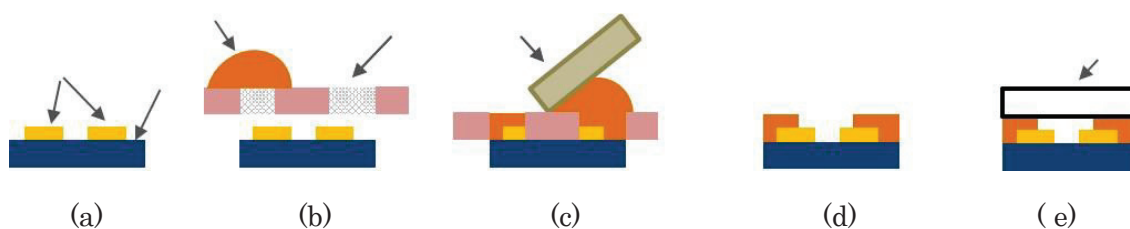


図 6.2 マイクロ流体デバイスの製造工程

(2) スクリーンメッシュ上にチャネルのパターンを印刷し、Si 基板の上に重ねてからポリイミドをスキージと呼ばれるヘラの様な道具でメッシュ上に印刷されたパターンを転写する (図 6.2(b), (c)) .

(3) スクリーン印刷にて転写されたポリイミドはまだ流動性を保っているため、ホットプレートに乗せて 120°C にて 30 分間加熱することでキュア (硬化) させた (図 6.2(b), (c)) .

(4) Si 基板上にガラス基板を重ね、 $1\text{kgf}/\text{cm}^2$ の荷重を加えながら 180°C にて 60 分間加熱して更にキュアを行うことで 2 枚の基板が接合されるようにした (図 6.2(d)) .

(5) Ag/AgCl の参照電極は Ag の電極を塩酸によって塩化することによって形成した.

図 6.3 は、圧膜樹脂を用いた接合技術を使って作成したマイクロ流体デバイスの写真を示している. pH センサーとしてのマイクロ流体デバイスである.

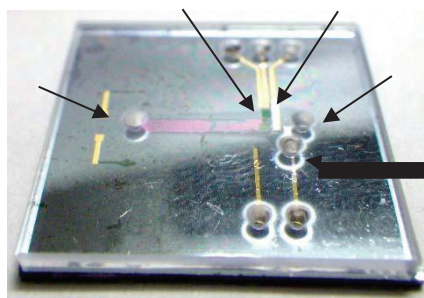


図 6.3 圧膜樹脂を用いた接合技術を使って作成したマイクロ流体デバイスの写真

6.3 結果と検討

本来 pH センサーのようなマイクロ流体デバイスにおける流路としてのチャンネル部分は 1mm 程度の高さを必要とするが、スクリーン印刷でポリイミド

を形成する場合はそれ程厚い膜を形成することは難しい。本研究において完成したマイクロ流体デバイスで pH を測定しようとしたが、電極を流路から外側に引き出す部分において接合が十分でない部分が生じたため（図 6.4 流体のリークが生じた樹脂の未接合部分）、正確な測定を行うことはできなかった。

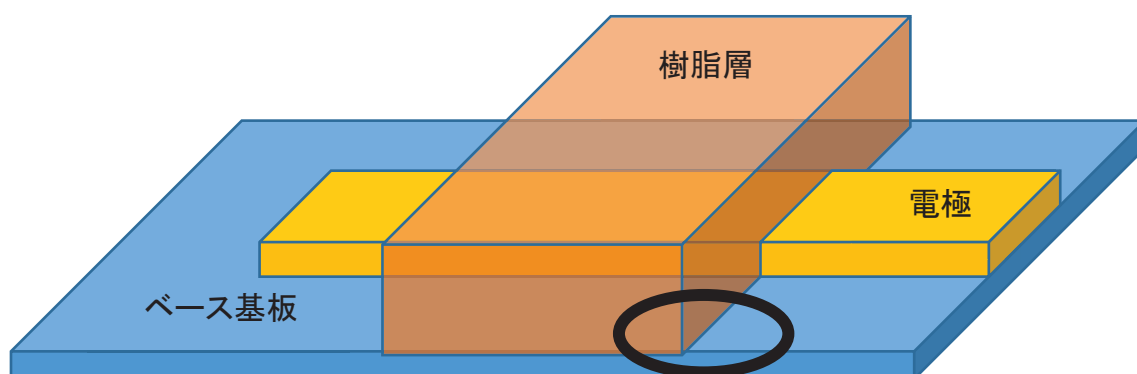


図 6.4 流体のリークが生じた樹脂の未接合部分

マイクロ流体デバイスの製造において、チャンネル部分のパターン形成と各基板の接合に厚膜樹脂を使えば、従来の製造方法で必要な陽極接合や手作業でしか対応できないフッ酸による接着といった工程を省けることが分かった。

電極を引き出す部分に生じる未接合部分でのリークを回避するため、樹脂の粘度、接合条件を見直し、基板全面での樹脂接合が完全に行われるよう最適化が必要と考える。

その際、樹脂を塗布する際の密着性を改善するためスピコーティング、スプレーコーティングを行った後にフォトリソグラフィプロセスによってパターン形成することも検討する。

また、圧膜樹脂のみでチャンネル部分の高さを 1 mm 程度にするのは難しいので、基板と基板の間にパターン加工済みのガラス基板をスペーサーとして挿入することで十分な高さのチャンネルを得ることができると思う。

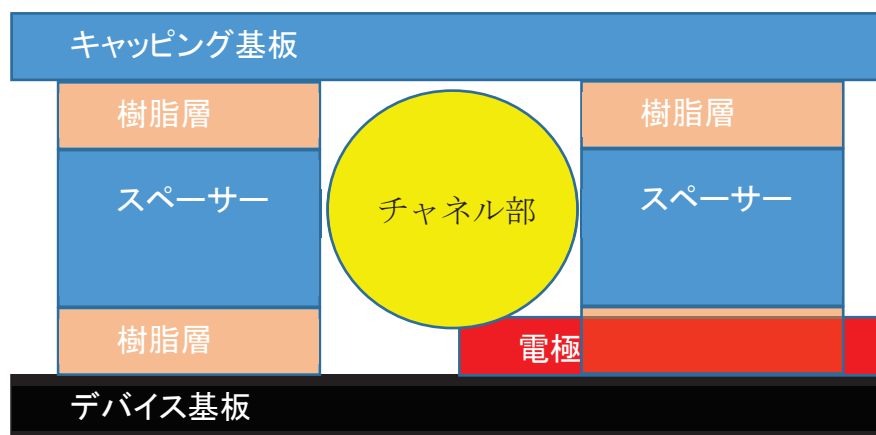


図 6.5 デバイス基板とキャッピング基板の間にスペーサー基板を追加したマイクロ流体デバイス

その際基板と基板の接合には樹脂を使用するが、デバイス基板、スペーサー基板、キャッピング基板間のパターン位置を高い精度で合わせる必要があるため、近赤外線を用いた局所的な仮固定を行ってから永久接合を行うことでずれの問題を解決できると考えている。

第7章 結論

7.1 結論

本論文では、厚膜樹脂を接合材料として使用したウェーハの永久接合プロセスにおいてアライナーを使って機械的に2枚のウェーハの位置を合わせて固定した後、局所的に仮固定を行うことでウェーハがずれることなく高いアライメント精度を維持する新手法の有効性を検討した。

まず研究室内に試験装置を準備することで、この局所的な仮固定方法について実証実験を行った。実験においては、感光性のポリイミド、BCB、SU-8と3種類の樹脂を接合材料として使い、照射部分の面積を絞ることのできるハロゲンスポットヒーターを近赤外線照射の光源として使用した。Si基板に対して透過性を持つ近赤外線を用いて、貼り合わせたウェーハの内部から加熱することで、局所的な仮固定が実現できることを検証した。この局所的な仮固定方法の実証実験を行うことで、実際のウェーハ接合工程においても、近赤外線による仮固定技術が利用できることが確認できた。結果として、2枚のSiウェーハについて、永久接合の前に局所的な仮固定を行った場合は、永久接合後のウェーハ間のずれが5 μm 以下という高いアライメント精度を実現できた。

一般的に樹脂を使ったウェーハ接合は低コストで実現できるが、高温時に流動性が高くなることから、厚膜樹脂での高いアライメント精度を維持することは難しいとされているが、本研究においては、接着層の厚みが10 μm ~30 μm といったアライメントのずれが比較的大きくなる傾向のウェーハ接合であっても、永久接合前に近赤外線を照射して局所的に仮固定しておくことで、高いアライメント精度を維持することができた。

また、ポリイミドを使った引っ張り試験の結果から、熱硬化樹脂である同材料でも温度条件を適切にコントロールしてやることで、十分な接合強度が得ることのできる材料であることが分かった。

更にマイクロ流体デバイスを試作することで、熱硬化性樹脂のポリイミドが実デバイスに適用できることが検証できたので、将来的には近赤外線によるスポット照射を利用した局所的な仮固定の技術と組み合わせることで、MEMS デバイスを製造する際の Wafer Level Packaging 技術において、高い接合強度、高いアライメント精度、加工難易度の低さ、製造コストの低減・簡略化など様々なメリットを同時に実現できる可能性があることを示した。

7.2 今後の課題

厚膜樹脂を用いた接合において、近赤外線による局所的な仮固定を行えば高いアライメント精度が実現でき、MEMS デバイスと LSI デバイスといった異種のウェーハを、ウェーハレベルでずれることなく接合できる。そうすることで従来 2 つのデバイスチップを回路基板上に別々に実装していた機能を、1 つのチップで実現することができるなど、将来的にデバイス製造における適用範囲を広げることができる。

また、ウェーハ基板の元の接合面と接合面をつき合わせて接合する方式では、加工の難易度が高い場合もあるため、熱硬化性樹脂を厚膜に形成することで、接合材料としての本来の機能を利用すると同時に、樹脂層自体に基板と同様の機能を持たせることができるので、MEMS デバイスの設計に自由度が生まれる。

さらに、Si 基板と SiO₂ 基板や Si 基板と化合物半導体基板など、既存の接合技術には課題の残る基板同士の接合も、そうした課題を克服し、デバイスに影響の少ない条件で接合できる可能性がある。

樹脂はある程度柔軟性を持つので、膨張係数の異なるウェーハを接合する場合に、残留応力を樹脂が吸収できる。将来的にウェーハのサイズが更に大きくなれば、こうした残留応力の問題がより顕著になるため、厚膜樹脂を使うことで解決できる可能性がある。

近赤外線による局所的な仮固定を使えば、接合時に液相となる共晶接合においても、高いアライメント精度の接合を行える可能性がある。元の金属の融点

より合金の融点の方が高くなるように設計しておき、永久接合前に数箇所だけを近赤外線を用いて内部から加熱することで仮固定しておけば、永久接合時に接合界面で金属が溶けて液相になってもウェーハがずれないという接合方法も検討できると考える。

参照文献

1. 井野英哉. MEMS の情報機器応用への期待. : 生産研究, 52 巻 (2000) 6 号, pp. 279-281.
2. 藤田博之. マイクロマシンの世界. : 工業調査会(1992), pp. 31-36.
3. T. Hirano et al. Micro-actuator for tera-storage. : Proc. MEMS (1999), pp. 441-446.
4. C. T. Clark, Nguyen et al. Micromachined Devices for Wireless Communications. : Proc. of the IEEE, vol 86(1998), No. 8, pp. 1756-1768.
5. G. Kaplan et al. The How and Why of Electronic Noses. : IEEE Spectrum, Volume 35 (1998), Number 9, pp. 22-34.
6. H. P. Lang et al. The Nanomechanical Nose. : Proc. IEEE MEMS (1999), pp. 9-13.
7. M. Despont et al. MEMS' 99. : IEEE MEMS (1999), pp. 564-569.
8. P. Vettiger et al. : Conf. Proc. ISFMS(1999), ASET, pp. 95-106.
9. 山田浩,小野塚豊, 飯田敦子, 板谷和彦, 舟木葵之, 株式会社東芝研究開発センター. 異種デバイス集積を実現するウエハレベルシステムインテグレーション技術. :エレクトロニクス実装学術講演大会,第26回 (2012) ,9B-07.
10. エレクトロニクス実装学会技術委員会. エレクトロニクス実装技術の現状と展望. :エレクトロニクス実装学会誌, Vol.14(2011), No.1, pp. 1-78.
11. SoC/SiP 技術に関する調査研究報告書(05-情-1). : 電子情報技術総合委員会 情報・デバイス技術委員会 2004 年度, 社団法人電子情報技術産業協会編.
12. 山田浩. 半導体デバイスと MEMS の融合における新たな展開. :エレクトロニクス実装学会誌, Vol.11(2008), No.1, pp. 43-47.
13. H. Yamada et al. MEMS-LSI Heterogeneous Device Integration Technology for System-on-Chip Applications. : 5th International Nanotechnology Conference on Communication and Cooperation (2009).

14. Highly Integrated MEMS-Pseudo-SoC Technology. : Prc. ICEP(2009), pp. 583-589.
15. H. Yamada. A Wafer-Level Heterogeneous Technology Integration for Flexible Pseudo-SoC. : ISSCC Digest of Technical Papers, Vol. 53(2010), pp. 146-147.
16. 式田 光宏. エッチング技術を駆使した微細なモノづくり. : 表面技術, 59 卷 (2008), 2 号, pp. 84-87.
17. 中山一雄, 上原邦雄. 新版機械加工. : 朝倉書店(1997).
18. 藤田博之. センサ・マイクロマシン工学. : オーム社(2005).
19. 江刺正喜, 藤田博之, 五十嵐伊勢美, 杉山 進. : マイクロマシーニングとマイクロメカトロニクス, (培風館, 1992).
20. M. Shikida, K. Sato, K. Tokoro and D. Uchikawa. Differences in anisotropic etching properties of KOH and TMAH solutions. : Sensors and Actuators A, Volume 80(2000), Issue 2, pp. 179-188.
21. H. Tanaka, S. Yamashita, Y. Abe, M. Shikida and K. Sato. : Sensors and Actuators A, 114, 516 (2004).
22. M. Puech, J. M. Thevenoud, J. M. Gruffat, N. Launary, P. Godinant, and O. Le Barillec. : Tech. digest of Transducers'2007, 77 (2007).
23. A. Koide, K. Sato, S. Suzuki, and M. Miki. : Tech. Digest 11th Sensor Symposium, 23 (1992).
24. V. G. Kutchoukov, M. Shikida, J. R. Mollinger and A. Bossche. : Journal of Micromechanics and Microengineering, 14, (1), 1029 (2004).
25. T. Kasai, Y. Tsurukame, T. Takahashi, F. Sato and S. Horiike. : Tech. digest of Transducers' 2007, 2613 (2007).
26. M. Shikida, M. Odagaki, N. Todoroki, M. Ando, Y. Ishihara, T. Ando and K. Sato. Non-photolithographic pattern transfer for fabricating arrayed three-dimensional microstructures by chemical anisotropic etching. : Sensors and Actuators A, Volume 116(2004), Issue 2, pp. 264-271.
27. M. Shikida, T. Hasada, and K. Sato. Fabrication of densely arrayed micro-needles with flow channel by mechanical dicing and anisotropic wet

- etching. : Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 16(2006), No. 8, pp. 1740-1747.
28. NIKKEI MICRODEVICES, 8, 2007, 日経 BP 社.
29. C. Zhang and K. Najafi. : Tech. Digest of MEMS'02, 160 (2002).
30. 鶴田和弘川原伸章柴田貴行,. : 電気学会論文誌 E(センサ・マイクロマシン
準部門誌)(2005), 125-E, 1, 1 (2005).
31. K. Abe, S. Yoshihara, J. Ohara, Y. Takeuchi, N. Kawahara. : Tech. digest of
Transducers'2007, 2405 (2007).
32. Michel Bruel, Bernard Aspar and Andre-Jacques Auberton-Hervé. Smart-Cut:
A New Silicon On Insulator Material Technology Based on Hydrogen
Implantation and Wafer Bonding. : Japanese Journal of Applied Physics, vol.
36, issue Part 1(1997), No. 3B, pp. 1636-1641.
33. 加柴 良裕, 町田 一道. 超高真空中での常温接合. : 溶接学会誌, 59 卷(1990)
2 号, pp. 100-104.
34. D. V. Keller. Adhesion between Solid Metals. : Wear, Vol. 6 (1963), pp. 353-
365.
35. W. P. Gilbreath. Definition and Evaluation of Parameters which Influence the
Adhesion of Metals. : ASTM STP, No, 431 (1967), pp. 128-148.
36. M. J. Hordon . Adhesion of Metals in High Vacuum. : ASTM STP, No. 431 (1967),
pp. 109-127.
37. D. H. Buckley. Influence of Chemisorbed Films of Various Gases on Adhesion
and Friction of Tungsten. : Journal of Applied Physics, Vo139 (1968) No. 9,
pp. 4224-4233.
38. The Influence of Crystal Structure, Orientation and Solubility on the Adhesion
and Sliding of Various Metal Single Crystals in Vacuum (10-11Torr). : ASTM
STP, 431(1967), pp. 248-271.
39. G. H. Walker. A Study of the Adhesion of Copper to Nickel. : Metallurgical and
Materials Transactions B, Vol. 2 (1971), p2189-2193.
40. 加柴, 町田, 奥田. 超高真空常温界面接合装置の開発. : 溶接技術 (1987) , pp.
88-91.

41. 赤池,舟久保. 超高真空中における金属の常温圧接. : 真空, 第 23 卷 (1980) 第 10 号, pp. 455-464.
42. 辻泰. 真空技術の現状と将来. : 応用物理, 第 51 卷 (1982) 第 8 号, pp. 878-882.
43. Y. Kashiba, K. Machida, T. Okuda, W. Shimada, and S. Nakata. Energy-free Bonding of Materials with Fine Controlled Surfaces in Ultrahigh Vacuum. : Materials Research Society Symposium Proceedings, Vol. 108 (1988), pp. 370-376.
44. 山下幹生, 原成一, 松永博之. Co₂ レーザ用硬質金属鏡の研磨. : 精密工学会 春期大会学術講演会論文集 (1986), pp. 287-288.
45. 大前伸夫. 金属表面の物性と摩擦・磨耗. : 潤滑, 第 30 卷(1985) 第 5 号, pp. 300-305.
46. 超高真空中の潤滑システム. : 鉄と鋼, 第 73 卷(1987) 第 10 号, pp. 1297-1302.
47. J.Ruge. 固相接合機構について. : 溶接学会誌, 第 47 卷(1978) 第 7 号, pp. 402-408.
48. 須賀, 宮沢, 坂上. 実技技術としての超高真空常温接合の可能性について. : プリント回路学会第 1 会学術講演大会, pp. 31-34.
49. 高橋誠(大阪大学 接合科学研究所). 陽極接合 —その原理と,様々な材料への応用の可能性. : NEW GLASS, Vol.25(2010), No. 3, pp. 7-12.
50. K. Hiller, R. Hahn, C. Kaufmann, S. Kurth, K. Kehr, T. Gessner, W. Doetzel, M. Wiemer and I. Schubert. Low Temperature Approaches for Fabrication of High Frequency Microscanners. : Proc. SPIE, 3878(1999), pp. 58-66.
51. G. Wallis, D. I. Pomerantz. Field Assisted Glass-Metal Sealing. : Journal of Applied Physics, Vol. 40(1969), pp. 3946-3949.
52. B.Hök, C.Dubon, C.Ovrén. Anodic bonding of gallium arsenide to glass. : Applied Physics Letter, Vol. 43(1983), pp. 267-269.
53. 山口典男, 大橋修. 陶磁器とアルミニウム箔の陽極接合に関する研究—釉薬組成の影響—. : 長崎県窯業技術センター研究報告, 56 号(2009), pp. 50-54.

54. 秦昌平, Jorg Fromel, Thomas Gessner. 陽極接合の低温化と接合強度の改善. : 第 19 回エレクトロニクス実装学術講演大会(2005), pp. 109-110.
55. 豊田真彦, 藤谷泰之, 名山理介, 山田正. 陽極接合によるホウ珪酸ガラスと金属の接合. : 溶接学会論文集, 11(1993), pp. 208-213.
56. Q. Shu, J. Su, G. Zhao, Y. Wang and J. Chen. Evaluation and characterization of titanium to glass anodic bonding. : Proc. ASME(2008), pp. 597-600.
57. 谷山慎悟, 王英輝, 王晨曦, 須賀唯知. 金薄膜を介したシリコンウエハ低温接合. : エレクトロニクス実装学術講演大会講演論文集, 19B-11.
58. H.Takagi , R.Maeda, T.Suga. Wafer-scale spontaneous bonding of silicon wafers by argon-beam surface activation at room temperature . : Sensors and Actuators, A105(2003), pp. 98-102.
59. C. Wang and T. Suga. Measurement of Alignment Accuracy for Wafer Bonding by Moire Method. : Japanese Journal of Applied Physics, 46(4B) (2007), pp. 1989-1993.
60. R. Takigawa et al. . Low temperature bonding of LiNbO3 waveguide chips to Si substrates in air. : Proc. Of SPIE 6050, pp. 6050/12/1-6050/12/6.
61. 萩原尚基, 小山真司. ギ酸を用いた金属塩生成接合法による Cu/Cu 固相接合. : 平成 24 年溶接学会全国大会講演概要, Vol. 91(2012), pp. 106-107.
62. S. Koyama, Y. Aoki and I. Shohji. Effect of Formic Acid Surface Modification on Bond Strength of Solid-State Bonded Interface of Tin and Copper. : Material Transaction, Vol. 51(2010), pp. 1759-1763.
63. V. Dragoi, T. Glinsner, G. Mittendorfer, B. Wieder, P. Lindner. Adhesive wafer bonding for MEMS applications. : SPIE, Vol. 5116(2003), pp. 160-167.
64. F. Niklaus, R.J. Kumar, J. J. McMahon, J. Yu, T. Matthias, M. Wimplinger, P. Lindner. Effects of Bonding Process Parameters on Wafer-to-Wafer Alignment Accuracy in Benzocyclobutene (BCB) Dielectric Wafer Bonding,. : Materials Research Society, Vol. 863(2005), pp. 160-167.

65. J. Q. Lujindal, Y. Kwon, J. J. McMahan, M. Rasco, R. Augur, T. S. Cale, R. J. Gutmann. Evaluation Procedures for Wafer Bonding and Thinning of Interconnect Test Structures for 3D ICs. : IEEE Proc. IITC (2003), pp. 74-76.
66. R. J. Gutmann, J. Q. Lu, S. Pozder, Y. Kwon, D. Menke, A. Jindal, M. Celik, M. Rasco, J. J. McMahan, K. Yu, T. S. Cale. A Wafer-Level 3D IC Technology Platform. : Proc. Advanced Metallization Conference 2003(2003), pp. 19-26.
67. Y. Kwon . Wafer Bonding for Three Dimensional (3D) Integration. : Ph.D. Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute (2003).
68. T. K. Chou, K. Najafi. 3D MEMS fabrication using low temperature wafer bonding with benzocyclobutene (BCB). : Tech. Digest of Transducers 2001(2001), pp. 1570-1573.
69. F. Niklaus, H. Andersson, P. Enoksson, G. Stemme. Low Temperature Full Wafer Adhesive Bonding of Structured Wafers. : Sensors & Actuators A, Vol.92/1-3(2001), pp. 235-241.
70. H. Andersson, W. Van der Wijngaart, P. Griss, F. Niklaus, G. Stemme. Hydrophobic Valves of Plasma Deposited Octafluorocyclobutane in DRIE Channels. : Sensors and Actuators B: Chemical, Vol.3638(2000), pp. 1-6.
71. J. Oberhammer, F. Niklaus, and G. Stemme. Selective Wafer-Level Adhesive Bonding with Benzocyclobutene for Fabrikation of Cavities. : Sensors and Actuators A: Physical, Vol.105(2003), No.3, pp. 297-304.
72. Sealing of Adhesive Bonded Devices on Wafer-Level. : Sensors and Actuators A: Physical, Vol.110(2004), No.1-3, pp. 407-412.
73. A.R. Mirza. Wafer-Level Packaging Technology for MEMS. : IEEE Proc. of the Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems 2000(2000), pp. 113-119.
74. One Micron Precision, Wafer-Level Aligned Bonding for Interconnect, MEMS and Packaging Applications. : Proc. of the Electronic Components and Technology Conference 2000(2000), pp. 676-680.

75. C. ReyerseKanev, E. MeuselS. Technical challenges of precision wafer bonding in controlled environments. : Proc. of the Symposium on Semiconductor Wafer Bonding, Physics and Applications 1995(1995), pp. 174-183.
76. F. NiklausEnoksson, E. Kälvesten, G. StemmeP. A Method to Maintain Wafer Alignment Precision During Adhesive Wafer Bonding. : Sensors and Actuators A, Physical, Vol.107(2003), No.3, pp. 273-278.
77. C. Brubaker, M. Jennison. Novel Concepts for BCB Processing. : Proc. International Microelectronics and Packaging Society (2006).
78. C. Brubaker and T.Matthias, M. Wimplinger. SU-8 BONDING FOR TRANSPARENT PACKAGING. : IWLPC(2006).
79. R. Arensman. TI Tries to Revive Stalled DLP Chip Sales. : Electronic Business Online 6/27/2006 (2006).
80. Sensing a Sensor Shakeout? : Electronic Business(2006).
81. K. Kim, D. Park, H. Lu, W. Che, K. Kim, J. Lee, C. Ahn. A Tapered Hollow Metallic Microneedle Array Using Backside Exposure of SU-8. : Journal of Micromechanics and Microengineering, 14 (2004), pp. 597-603.
82. B. Weider. IDI/EVG Thick Resist Dispense System Evaluation Pump Model IDI M600 HVP. : Retrieved from:http://www.microchem.com/resources/IDI_Pump_with_SU-8.pdf(2006).
83. NANO™ SU-8 2000 Negative Tone Photoresist Formulations 2035-2100. : Retrieved August 4, 2006 from:http://www.microchem.com/products/pdf/SU8_2035-2100.pdf(2002).
84. S. K. Sampath, L. St. Clair, X. Wu, D. V. Ivanov, Q. Wang, C. Ghosh, K. R. Farmer. Rapid MEMS Prototyping Using SU-8 Wafer Bonding, and Deep Reactive Ion Etching. : Proceedings of the 14th Biennial University/ Government/ Industry Microelectronics Symposium (2001).
85. T. Glinsner, V. Dragoi, et al. Wafer Bonding using BCB and SU-8 intermediate layers for MEMS Applications. : Semicon Taiwan (2002).

86. 松浦 秀一. フィルム状ポリイミド接着剤. : 高分子, 39 卷 (1990) 6 号, pp. 441.
87. 松浦秀一. : 電子材料, 26(10), 35(1987).
88. 松浦秀一, 宮寺康夫. : 高分子加工, 38(5), 37(1989).
89. Jong-Seung Park and Ampere A. Tseng, Department of Mechanical and Aerospace Engineering. Transmission laser bonding of glass with silicon wafer. : Proc. JUSFA Japan(2004), pp. 1-7.
90. Frank Niklaus, Peter Enoksson, Edvard Kälvesten, Göran Stemme. A method to maintain wafer alignment precision during adhesive wafer bonding. : Sensors and Actuators A107(2003), pp.273-278.
91. C.H. Wang, J. Zeng, K. Zhao and H. L. Chan. Chip scale studies of BCB based polymer bonding for MEMS packaging. : Proc. of Electronic Components and Technology Conference (2008), pp. 1869-1873.
92. H.A.C. Tilman al et. Wafer-level packaged RF-MEMS switches fabricated in a CMOS fab. : Tech. Digest of IEDM(2001), pp. 921-924.
93. K. I. Kim, J. M. Kim, J. M. Kim, G. C. Hwang, C. W. Baek, Y. K. Kim. Packaging for RF MEMS devices using LTCC substrate and BCB adhesive layer. : Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 16(2006), pp. 150-156.
94. Murillo, G., Davis, Z.J., Keller, S., Abadal and G., Agusti, J. Novel SU-8 based vacuum wafer-level packaging for MEMS devices. : Microelectronic Engineering, Vol.87(2010), pp. 1173-1176.
95. Mitri, E., Birarda, G., Vaccari, L., Kenig, S., Tormen, M. and Greci G. SU-8 bonding protocol for the fabrication of microfluidic devices dedicated to FTIR microspectroscopy of live cells. : Lab Chip, Vol.14(2014), pp. 210-218.
96. 川畑達央. 厚膜レジスト SU-8 による LIGA ライクプロセス. : 表面技術, Vol. 50 (1999), No. 11, pp. 956-960.
97. S. Metz, R. Holzer, P. Renaud. Polyimide-Based Microfluidic Devices. : Lab on a Chip, Vol1 (2001), pp. 29-34.

謝辞

本研究は，鳥取大学大学院工学研究科博士過程において主指導教官の鳥取大学大学院工学研究科情報エレクトロニクス専攻，李相錫教授のご指導の下に行なわれたものであります。

ご指導，ご鞭撻を賜りました岸田悟教授，市野邦男教授，李相錫教授に心から感謝し厚く御礼申し上げます。

また，講義およびご指導を賜りました，鳥取大学大学院工学研究科情報エレクトロニクス専攻の先生方，研究にご協力いただいた研究室の皆様にも御礼申し上げます。

学内事務関連につきまして，工学部大学院係 金澤真紀様にも大変お世話になり，誠にありがとうございました。

実験装置の作成にご協力いただいた菱光社様，接合技術でご協力いただいた山中ヒューテック様，商業装置の開発で研究内容の実現にご協力いただいたシグマ光機様にも心から感謝し厚く御礼申し上げます。