Si微細加工および貼り合わせ技術を利用した 超微細ピッチ配線技術

非会員 鈴木 孝彰*, 非会員 内野 和好*, 非会員 横井 哲郎*

非会員 黎 耀明**, 非会員 滝沢 広幸**

正員 前田 龍太郎***, 非会員 高木 秀樹***, 非会員 花田 幸太郎***

* (東成エレクトロビーム(株)), ** (東京カソード研究所(株)) *** (独立行政法人産業技術総合研究所)

Ultra-Fine Pitch Electrical feed through using Si deep etching and bonding wafer

Takaaki Suzuki, Nonmember, Kazuyoshi Uchino, Nonmember, Tetsurou Yokoi, Nonmember,
Yumen Rai, Nonmember, Hiroyuki Takizawa, Nonmember,
Ryutaro Maeda, Member, Hideki Takagi, Nonmember, Koutarou Hanada, Nonmember
*(Tosei Electrobeam CO.,LTD) **(Tokyo Cathode Laboratory CO.,LTD) *** (AIST., MITI.)

Si based multi-layered print circuit board is developed. The Si wafer, which has the same thermal coefficient as mounted chips, of 4 inch size was used and we have fabricated the electrical feed through by filling the metal into the small holes prepared by ICP etching. Moreover the wafers with through holes and trenches were aligned and bonded to make the stacked layer structure and we had tried the metal filling into the holes and trenches. The fabricated device was tested by insulation measurement. As a result, insulating layer of more than $1\text{G}\Omega$ was obtained.

キーワード: ドライエッチング, 高アスペクト比, 直接接合, 金属注入

Keywords: dry etching, high aspect ratio, direct bonding, metal injection

1. まえがき

近年の工業発展において電子技術および電子デバイスの実装技術が果たしてきた役割は大きい。Siを素材とした実装基板技術の開発はまだ開発が緒に終わったばかりである^(1~3)。

Siウエハ貫通技術を前提として、両面実装、3次元実装に至る技術開発を目指すための第一歩としてここではSiを基板材料として、超精密・微細実装用基板を製作する。これより両面基板化、マイクロマシンのアクチュエータ、センサ、信号処理の融合化の技術的突破口となることが期待される。

Siウエハへの微細穴形成は、これまでもレーザ加工、超音波加工、放電加工により可能であったが、かなり穴径は大きく、加工アスペクト比も小さい。また時として加工壁面は荒れている場合が少なくない。これらの方法

では、 $100\mu\text{m}$ 以下の微細な貫通穴をウエハに形成することは、つい最近までは極めて困難であった。ところがここ数年のマイクロ加工技術(反応性イオンエッチング、放射光利用加工)の進展により、ウエハを貫通するような微小な穴形成までもが可能となってきた。

複雑な配線を有する実装基板の開発が現在始められている^(4,5)。本研究では複数の微細貫通パターンを有するSiウエハを重ねることによって、マトリクス配列の配線の引き出しを設計することを試みた。この構想において、複数の微細加工を施したウエハを正確かつ密着性よく接合する技術を必要としている。マイクロマシニング分野において、Si直接接合という技術が近年では注目されている。本研究開発のような多層実装基板に応用する例はまた報告されていない。ここで、本研究開発はこの技術を応用することを提案した。

本研究開発の目標である実装多層基板において、もう一つ不可欠な技術は、三次元構造を有する微細穴への導電性金属充填技術である。本研究開発で設計した配線ホールは微細かつ高いアスペクト比と複雑な三次元構造も有するため、通常的手法では困難であることが予想される。ここで、種々の方法で金属を充填する技術検討を行った。また、密に金属が注入された後の隣接穴間の絶縁性を評価した。

2. 実験方法

Siウエハの高アスペクト比の微細穴加工技術は、近年開発の著しい誘導結合型エッチング装置 (Inductively Coupled Plasma STS社製) を利用する。この装置は、Bosch社の特許をもとにしており、SF系のエッチングガス (Siを加工するガス) とCF系のパシベーションガス (加工後の側壁を保護するガス) を交互に流すことでSiを異方性エッチングする。チャンバ内の圧力、スイッチング時間、ガス流量を最適化することで要求する加工精度が得られる。(100) Siではその面に垂直方向に穴が加工される。ここでは4インチのウエハサイズで、最小穴径は $\phi 20 \mu\text{m}$ とし、最適なマスク材料と両面パターンニング及びエッチングによる手法を考案し、三次元的な微細配線ホールを設計・製作する。図1に溝部配線パターンの一部を示す。溝の長さは5.4mm以上である。

以上の方法で得られた三次元的な配線ホールを有した基板を次の方法で洗浄した。まず、不要なフォトリソを剥離するためアセトン中で超音波洗浄を施した。次にアンモニア水+過酸化水素水+純粋を体積比1:1:5の割合の混合溶液中に加工したSiを10分間超音波洗浄し、不要金属部分を除去し、硫酸+過酸化水素水を体積比1:1の混合した溶液中で有機物を除去した。その後、バッファードフッ酸 (LL6:1) で酸化膜を

図1. 溝部の配線パターン一部
Fig.1. A part of trench pattern.

除去しメガソニック洗浄を行った。

洗浄後のウエハはアライメント機構を備えた接合装置 (EVG社製 EV620) で加圧 1.76kgf/cm^2 した状態で10分間保持し、仮接合した。図2に多層基板モデル断面図を示す。

接合したウエハは図3に示す赤外線透過カメラを備えた装置で、接合状態を確認した。次に仮接合済みSi基板を絶縁化するために 1100°C 、6時間で SiO_2 をつけるように処理した。

金属の注入には粉末注入 (パウダーインジェクション) 法、銀ペーストによる注入、低融点金属+真空吸引法、静水圧法に似た方法 (本研究では擬静水圧法 (Pseudo-Isostatic-Press Method) と呼ぶことにする) を検討した。粉末注入法ではAgあるいはAg+Cuの微粉末をバインダ剤 (高分子) と混合し注入する。銀ペーストによる注入ではAg微粉末と有機溶剤 (シンナーなど) を混合し、専用治具で吸引する方法である。

図2. 多層基板モデル図

Fig.2. Cross section of multi-layer structure model.

図3. 接合確認装置

Fig.3. Bonded wafer check apparatus.

低融点金属+真空吸引法では溶融したInを注入金属とし、真空と大気との差圧を利用して注入する。擬静水圧法では密閉した圧力容器内にSnを入れ真空中でSnを溶融させ、プレスすることにより等方的に圧力がかかり、高密度の充填が得られる方法である。

金属注入後の隣接穴との絶縁性は、1～500Vの電圧を印加し、電流値から抵抗を算出した。図4にサンプル製作の手順を示す。

図4. 試料作製手順

Fig.4. Procedure of specimen preparation.

3. 実験結果

〈3.1〉 3次元的な微細穴加工技術結果 Si ウエハ厚み 300 μm 、穴径 $\phi 40 \mu\text{m}$ の貫通穴加工したときのエッチングレートと深さの関係を図5に示す。これより深さと加工時間の関係を概算した。3次元的な配線

パターンの製作ではSiウエハの両面に異なった配線パターン(貫通穴と溝)を形成しそれを貫通させることで得られた。図6に溝幅 40 μm 、溝深さ 100 μm と穴径 $\phi 60 \mu\text{m}$ 、深さ 200 μm の3次元配線パターンを例を示す。なお、ドライエッチングの深さは金属注入を考慮した深さとした。

図5. エッチング時間と穴深さの関係

Fig.5. Relation between etching time and depth(etching rate).

図6. 3次元配線パターン加工後断面図

Fig.6. Cross section after Si dry etching for three dimension feed through pattern.

〈3.2〉Si 直接接合結果 図7に加工したSiウエハを洗浄工程を経て仮接合し、確認装置で接合状態を観察したもの、図8に接合を繰り返して4層基板を製作した断面図を示す。なおストレート穴径は $\phi 40 \mu\text{m}$ である。これから分かるように加工ウエハ同士のアライメントのずれがなく、ウエハ層間の隙間のないことから強固に結合していることがわかる。接合確認装置で一部黒い部分が

が見えるが、これはウエハを保持した時の汚れ、パーティクルと考えられる。

図7. Si ウエハ接合観察図
Fig.7. Bonded Si wafer observation.

図8. Si ウエハ4層接合断面図
Fig.8. Cross section of four layers bonded Si wafer.

〈3.3〉金属注入法の結果 溝部では溝幅 $40\ \mu\text{m}$ 以上、溝長さが約 5.4mm 以上、溝深さが $100\ \mu\text{m}$ という寸法なので密に金属を注入するには4種類の方法を実施した。しかし、注入金属が固体粉末である粉末注入法、銀ペースト吸引法では溝部に注入されなかった。結合剤の気化や圧力損失の影響と考えられる。一般的な流体の円筒圧力損失 Δp は上流点圧力 p_1 、下流点圧力 p_2 とすると次式で与えられる。

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \lambda \cdot l/d \left(\gamma \cdot v^2/2g \right)$$

λ : 係数、 l : 長さ、 d : 内径、 γ : 比重、 v : 平均流速、 g : 重力加速度である。固体では平均流速が遅くなるた

め圧力損失が大きく注入できなかったと考えられる。

注入金属として In を用いた真空吸引法では、真空チャンバ内のサンプル上に低融点金属を加熱し液状化させ、大気圧に真空チャンバを解放した時の差圧を利用してスルーホール内に金属を注入する方法である。穴部と溝部の交錯した部分でも一部注入できた。図9にその一部を示す。しかし、今回の実験では穴部と溝部のある1枚のウエハのみ（厚み $300\ \mu\text{m}$ ）での実績である。また In の融点が約 156°C であることから高温になるデバイスには不適と考えられる。

図9. 真空吸引法で溝部に In を注入したサンプル
Fig.9. Injection (In) into trench pattern by suck vacuum.

In よりも融点が高い (232°C) Sn を用いた擬静水圧法の注入は、HIP (Hot Isostatic Pressing : 熱間等方圧加圧) 法を参考にし、本研究に適した製作プロセスを考案した。真空チャンバ内にサンプルと金属粉末を入れ、高温加熱し金属を溶融させると同時に、等方向から圧力をかける方法である。図10にその装置模式図を示す。サンプルのシリコンは脆性材料のため一定方向に耐荷重以上かけるとサンプルが破損する。本方法ではサンプルにかかる圧力が等方的であるためサンプルが破壊されることなく、ストレートの穴や溝部の微細構造への金属が充填できた。しかし、サンプルが Sn の鑄ぐるみ状態で取り出されるためその不要部分の除去が必要である。図11, 12に本方法で注入した断面図を示す。図中の穴径は $\phi 40\ \mu\text{m}$ 、溝幅 $60\ \mu\text{m}$ 、溝深さ $100\ \mu\text{m}$ である。

4種類の金属注入法を実施し、注入精度、問題点を比較した結果を表1に示す。

〈3.4〉絶縁抵抗測定結果 配線ホールの内壁に熱処理によって絶縁酸化膜を形成し、前述の擬静水圧法で金属を注入した隣接ホール間の絶縁抵抗を計測した。

図 10. 擬静水圧法装置模式図

Fig.10. Device model of pseudo Hot Isostatic Pressing method.

図 11. 金属 (Sn) を注入した断面図 (1)

Fig.11. Cross section of metal(Sn) injected.

図 12. 金属 (Sn) を注入した断面図 (2)

Fig12. Cross section of metal(Sn) injected.

表 1. 金属注入結果比較

Table1.Comparison of metal injected method.

注入方法	注 入 金属	注 入 精度	問題点
粉末注入法 (Powder injection)	Ag (Ag+Cu)	劣る	穴と溝部の交錯 部は未注入
銀ペースト 吸引法	Ag	劣る	密度不足 (断線)
低融点金属 真空吸引法	In	良い	・ 不要部分の除去 ・ 複雑 3 次元形状が困難 ・ 高温に不適
擬静水圧注 入法 (Pseudo Hot Isos- tatic Press)	Sn	良い	不要部分の除去

最小穴ピッチは $80 \mu\text{m}$ である。表 2 にその測定結果を示す。抵抗値は測定電圧範囲で $1\text{G}\Omega$ を超えており、スルーホール間に注入した金属の間に良好な絶縁抵抗が得られることを確認できた。

表 2. 絶縁抵抗測定結果

Table2. Measurement result of insulator resist.

印加電圧 (V)	1	10	20	30	50	100
実測電流 (10^{-10}A)	1	3	3	3	4	5
絶縁抵抗 ($\text{G}\Omega$)	1	3.3	6.7	10	12.5	20

4. むすび

次世代実装技術用ボードの開発を狙い、半導体チップと同一の熱膨張係数を有する Si ベースの多層配線基板を製作し、以下の結果を得た。

(1) 誘導結合型プラズマエッチングにより、厚み $300 \mu\text{m}$ の Si に穴径 $40 \mu\text{m}$ 以下、溝幅 $40 \mu\text{m}$ 以下の微細配線用ディープエッチング技術、両面からのエッチングによる 3 次元エッチング技術を開発した。

(2) 微細加工した SUEH 同士のアライメント技術、直接接合技術による多層化の開発を行った。

(3) 微細穴への金属注入では、Sn を用いた擬静水圧プレス法により高密度の注入が可能である。

(4) 微細穴内壁に絶縁層 (SiO_2) を形成し、電圧100Vで絶縁抵抗 $1\text{G}\Omega$ を得ることができた。

しかし、金属注入後のSiベースの多層配線基板には表面に不要金属があるためこの除去作業が課題となっている。この解決にあたっては平坦化のための研磨技術(ラッピング、ポリッシング)が有効であると考えられる。

また、本研究は地域コンソーシアム研究開発事業としてNEDOからの委託を受けた立川商工会議所からの再委託業務として共同研究を実施したものである。

(平成14年1月4日受付,平成14年4月9日再受付)

文 献

- (1) X. Li: "High density electrical feed through fabricated by deep reactive ion etching of Pyrex glass", Proceedings of IEEE MEMS 2001, Interlaken, 98.
- (2) D. W. Lee: "Fabrication of microprobe array with sub 100nm nano-heater for nanometric data storage", Proceedings of IEEE MEMS 2001, Interlaken, 204.
- (3) J. Q. LU: "3-D integration using wafer bonding", Advanced Metallization Conference 2000, Oct. 3-5, 2000 San Diego, 1.
- (4) A. Satoh: "Formation of Through-Holes on Silicon Wafer by Optical Excitation Electropolishing Method", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 39, No. 2A (2000) 378
- (5) 真篠直寛他: "チップレベル3次元実装用配線技術の開発", 第11回マイクロエレクトロニクスシンポジウム論文集p327-330 (2001)

鈴木 孝彰 (非会員) 1973年7月10日生まれ。東北大学

工学部材料物性系材料物性学科卒業。同年4月東芝機械株式会社入社。00年8月東成エレクトロビーム株式会社入社、生産技術に携わる。Siのドライエッチングなどの研究に従事。

内野 和好 (非会員) 1967年1月10日生まれ。97年4月東

成エレクトロビーム株式会社入社、生産技術に携わる。主としてSiの高アスペクト比加工などの研究に従事。

横井 哲郎 (非会員) 1958年7月13日生まれ。

日本大学生産工学部機械工学科卒業

91年4月東成エレクトロビーム(株)に入社。主として構造設計と製造技術に従事。現在、取締役本社工場長。

黎 耀明 (非会員) 1969年2月27日生まれ。日本工業大学

機械工学科卒業。97年(株)東京カソード研究所に入社。主としてICプローブの研究開発に従事。

滝沢 広幸 (非会員) 1953年12月29日生まれ。千葉工業

大学精密機械工学科卒業。75年(株)東京カソード研究所に入社。主として装置設計、ICプローブの開発に従事。

前田 龍太郎 (正員) 1952年4月20日生まれ。東京大学

大学院修士課程修了。マイクロファブリケーション、ハイアスペクト比加工、圧電材料の成膜技術などの研究に従事。現在、産総研機械システム研究部門集積機械研究グループ長。工学博士。

高木 秀樹 (非会員) 1965年5月2日生まれ。東京大学

大学院修士課程修了。金属、セラミックス、半導体材料の接合、マイクロマシン接合技術の研究に従事。現在、産総研機械システム研究部門集積機械研究グループ主任研究員。工学博士。

花田 幸太郎 (非会員) 1969年6月27日生まれ。電気通信大

学大学院博士課程修了。主として粉末冶金、材料プロセス、塑性加工の研究開発に従事。現在、産業技術総合研究所機械システム部門循環型材料加工グループ研究員。