

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 18 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560111

研究課題名（和文）熱硬化性樹脂／金属複合材料の超精密切削加工技術の開発

研究課題名（英文）Development of ultra-precision cutting method for composite material with thermosetting resin and electric conductor

研究代表者

堀尾 健一郎 (HORIO KENICHIRO)

埼玉大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：60201761

研究成果の概要（和文）：

本研究は、高い粘着性を有する熱硬化性樹脂と金端子が混在する基板表面を、双方の段差が数百 nm 以下になるよう平滑に超精密切削加工する手法を開発し、複数のシリコン基板の積層による半導体シリコン基板積層技術を実用化することを目的としている。平成 23 年までの研究では、半硬化状態の熱硬化性樹脂に対する精密切削加工におけるダイヤモンド工具の磨耗防止策の開発と超高速スピンドルと微小エンドミルを用いたバンプ部分の微細除去技術の開発という二つの課題に対し、それぞれ高精度な切削実験を行うための機器開発と、工具形状・材質の微細形状創成に与える影響の調査を行った。

研究成果の概要（英文）：

This study deals development of a new precision cutting method for composite material with thermosetting resin and electric conductor. In manufacturing process of a large scale integrated circuit, a pasting process between two ceramic substrates with thermosetting resin is required. In this study, a new cutting method with single crystal diamond byte to realize high flatness of machined resin surfaces is developed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：切削、ダイヤモンド工具、樹脂、半導体、熱硬化性樹脂、基板材料

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、半導体の設計においては高集積化による実装面積の集約が強く求められている。そのため新しい半導体実装技術として、複数のシリコン基板の信号線をバンプと呼ばれる多数の純金製端子で導通させ、BCB 樹

脂 (Benzocyclobutene:ベンゾシクロブテン) やエポキシ樹脂といった熱硬化性樹脂の接着によって固定する半導体積層技術の実用化が期待されている。このシリコン基板の積層工程では、以下に示す 4 段階の処理が行われる。

- 1.基板上の回路端子部分にバンプを設置し、熱硬化性樹脂を塗布する。
- 2.樹脂が完全に硬化しない温度(160 度~185 度)まで基板を加熱し、樹脂を半硬化させる。
- 3.樹脂およびバンプを同時にダイヤモンド工具によって切削し、平滑な加工面を創成する。
- 4.基板同士を加圧・密着させて各バンプを導通させた後、加熱して樹脂を硬化させ接着する。

このうち 4. の接着に際しては、バンプ間の導通を確保するため樹脂とバンプの境界部分における段差が 100nm 以下である必要があるとされる。しかしながら、高い粘着性を有する樹脂材料を高精度に切削する条件や、樹脂と金属との境界を工具刃先が通過する際に生じる現象には不明な点が多く、接合条件を満たす面性状を 3.の切削によって加工面に与えられるかは明らかでなかった。

(3) この問題に関して、申請者らは過去にフライカット加工機による超精密切削の加工条件の検討を行ってきた。半硬化状態の樹脂単体およびバンプと樹脂との複合材に対する切削実験を実施し、半硬化時の温度および切削条件の変更に対する加工面の状態を調査した。その結果、従来の切削手法では以下の特徴的な現象が生じ、切削距離に対して面のあらさおよびバンプ・樹脂間の段差が急激に増加することが確認されていた。

A.半硬化状態の熱硬化性樹脂の切削では、樹脂の一部が逃げ面およびすくい面上に固着し大きな摩擦力が工具刃先に作用する。また、固着樹脂の脱落に伴いダイヤモンドの磨耗が急速に進展する。

B.工具刃先が樹脂→バンプ→樹脂と異種材料の境界を通過する際に、切屑の断続的な流出および固着樹脂の脱落が発生し、境界付近に樹脂が押しならされて大きな段差形状が生じる。

(4) これらの結果から、基板同士の接合を満足するに足る性状を実現するためには、ダイヤモンド工具に対する熱硬化性樹脂の固着を防止し、バンプ・樹脂の境界において加工面への押しならしを生じさせない新しい超精密切削加工技術の開発が必要であると考えられた。

2. 研究の目的

本研究では、半硬化状態の熱硬化性樹脂に対する精密切削加工におけるダイヤモンド工具の磨耗防止策の開発と、超高速スピンドルと微小エンドミルを用いたバンプ部分の微細除去技術の開発を行うことを目的とした。これはバンプと樹脂が混在する箇所を局所的に微小エンドミルにてまず先に除去し、その後フライカットによって残る樹脂の部分を除去することにより異種材料の境界を工

具が通過する際の影響を回避して平滑な面を接合面に与えようとするものである。

3. 研究の方法

研究の方針としては、上で述べた目的に対して(1)工具磨耗そのものを切削条件の変更によって防止する手法、(2)微細溝形状の選択的形成による樹脂脱落の実現、の2つの手法についてそれぞれの有効性の検証を行った。

(1) 半硬化状態の熱硬化性樹脂材料に対する精密切削加工におけるダイヤモンド工具の磨耗防止策の開発では、工具表面のダイヤモンド薄膜に対する樹脂材料の熱・化学的な反応を抑制する加工条件を検討し、工具刃先に対する樹脂の固着を予防する手法を開発した。すなわち、樹脂材料の冷却による硬度の増加/粘着性の抑制、切削環境の酸素濃度の調整を実施し、加工環境の変更によるダイヤモンド薄膜に対する樹脂材料固着の防止と、それによる工具磨耗の抑制を実現する手法を縦型超精密旋盤機による切削実験を通じて検討した。

(2) 超高速スピンドルと微小エンドミルを用いたバンプ部分の微細除去手法の開発では、バンプとその周囲の熱硬化性樹脂をフライカットの前にエンドミルを用いてあらかじめ除去し、フライカットのダイヤモンド工具が金製のバンプと接触しないような溝状の微細形状を創成する手法の開発を行った。具体的な手順としては、図に示すように多軸制御されたスピンドルを用いて[バンプ周囲の樹脂材料]→[バンプ]を順に除去する。その際、エンドミル工具の形状にあわせて相対姿勢を常に変更しながら主軸を運動させることによって切屑の流出方向を制御し、バンプの周囲に樹脂が押しならされない切削を実現した。手法の実現に際してはまず工具経路・姿勢の計画を行う CAM アルゴリズムを開発し、次にフライカット機と多軸制御フライスを統合した専用の複合加工機を開発した。そして開発した加工機上にてバンプの位置および樹脂の高さを計測し、溝形状の底面とフライカット工具の通過位置が一致するようフライカット工具とエンドミル工具の相対座標原点を機上にて補正する技術を開発した。これにより異なる種類の切削工具を併用した樹脂切削によって平滑な接合面を創成することが可能となった。

4. 研究成果

以下に本研究で開発した装置および加工法の概要とそれらの結果を示す。これらの加工では、図1に示す基板間の接着に際して、熱硬化性を有する樹脂材料と回路導通用の純金製端子が混在する面を、各部の段差が

100nm 以下となるようにフライカットにより切削することが目標となる。現状では、図 3 に示すような押しならしの発生とダイヤモンド工具の摩耗による平面度の悪化を防止することが必須とされており、これらの防止策を開発・検討した。

(1)の半硬化状態の熱硬化性樹脂材料に対する精密切削加工におけるダイヤモンド工具の磨耗防止策の開発では、磨耗の抑制のために工具を構成する単結晶ダイヤモンドの炭素原子の化学的反応および熱的反応を抑制する手段として、切削雰囲気を変更し、磨耗の進展と加工面粗さに対する影響の調査を行った。

図 4 に実験に使用した縦型超精密旋盤を、表 1 に実験条件を示す。単結晶ダイヤモンドバイトによる微小切込切削条件化で、加工環境にアルゴンガスおよびヘリウムガスを連続して吹きつけ、切削雰囲気における酸素濃度を低下させた不活性な環境下で切削を行った。また、それと別にボルトテックスチューブを用いて圧縮空気の噴出による冷風を発生させ、これをダイヤモンドバイトに対して吹きつけることで熱硬化性樹脂の硬化と化学反応を抑制した状態で切削実験を行った。試料の生成では、長時間の切削に伴う固着と磨耗の進展を調査するため、通常の熱硬化性樹脂膜に比べて 3 倍近い $60\mu\text{m}$ の厚さの樹脂薄膜をシリコン基板上にスピンドクターによって塗布し、これを 170° で中途硬化させて半導体製造時の環境を再現している。

図 5 は実験結果のうち典型的な刃先条件の例を示す。切削の進展に伴い、工具刃先の状態は

A: チッピングが無く樹脂も固着しない
 B: チッピングは無いが樹脂が多く固着
 C: チッピングが発生し加工面性状が悪化
 という 3 つの段階に順に進展する。低酸素状態での切削結果と低温状態での切削結果を組み合わせ、各条件での刃先状態をまとめた結果を表 2 に示す。本結果では、低温切削 (-14°C) の条件の下で樹脂の固着がほとんど生じず、チッピングを防止することが可能となっている。加工雰囲気中の酸素濃度の影響については、 -6°C 以上の条件下において酸素濃度をアルゴンガス、ヘリウムガスのいずれを用いて低下させた場合でも固着樹脂の発生がみられ、図 6 のような固着樹脂が刃先を構成する傾向が見られた。これらの条件の下での切りくずの形状は、図 7 のように流れ型ではなく、樹脂のむしれの影響を受けた形状となる傾向が見られた。

上記の実験結果より、工具刃先の切削距離に対する工具刃先丸み半径の推移を図 8 に示す。各条件の組み合わせによる刃先丸み径

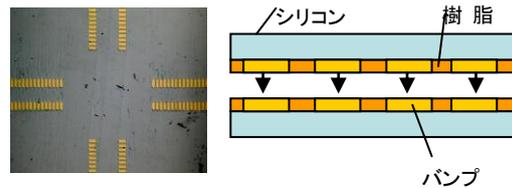


図 1 多層基板の接着による多層化

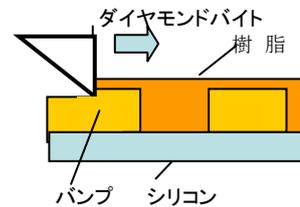


図 2 熱硬化性樹脂の切削 (フライカット) による平滑化加工

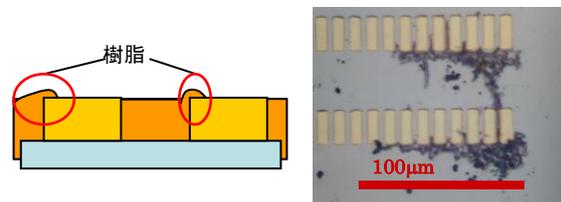


図 3 樹脂・バンブ境界面における押しならし発生による平面度悪化

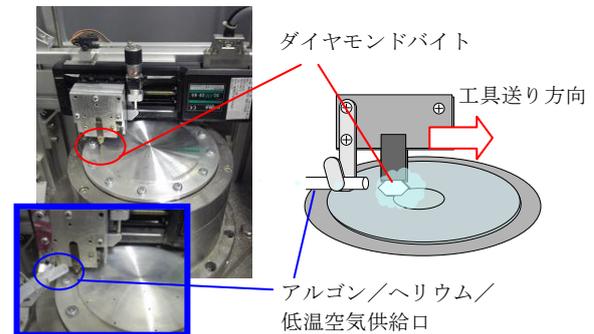


図 4 超精密縦型旋盤

表 1 実験条件

バイト	単結晶ダイヤモンドバイト (R5 バイト)
すくい角, 逃げ角	0° , 10°
試料回転数	1000rpm
送り量, 切込み量	5, $10\mu\text{m}$
加工雰囲気	低酸素 (Ar, He), 低温 (-14°C , -6°C , 0°C), 低酸素低温, 供給なし
切削試料	160°C 中途硬化, BCB, 5 インチ

には大きな差は見られず、いずれの場合も切削距離にほぼ比例して増加する傾向が見られた。

(2)の超高速スピンドルと微小エンドミルを用いたバンプ部分の微細除去手法の開発では、専用の加工機を開発し、スクエアエンドミルの角部分を多軸制御によって接近させて微細溝をバンプの周囲に生成する手法を開発した。図9は本手法の概念を示す。図10に示す多軸加工機上において、レーザー距離計および工学顕微鏡を用いて工具・基板間の相対位置および姿勢を推定し、これを元に位置決めを行なって切削を実施した。

表3は良好な溝側面形状を得る切削条件を調査した際の実験条件を示す。図11に示す工具姿勢に対して図12に示すように溝端面の直進度をそれぞれ光学観測によって測定し、良好な形状が見られる工具の基板に対する相対姿勢と加工条件の探索を行った。図13は相対姿勢および工具種類(超硬合金、ハイス)が端面形状にもたらす影響の分布を示す。実験結果からは、真直度の高い溝端面を得られる回転角 θ は傾斜角 ϕ によって大きく変化することが分かる。一方、ハイス工具による切削では側面切削と底面切削による真直度の違いが少なく、超硬工具での切削よりも溝端面の真直度が高い溝が得られることが明らかとなった。

微細溝形状のフライカットの切削時のバンプ周囲の押しならし発生抑制への効果を検証した例を図14以下に示す。微細溝をフライカット方向の前後にそれぞれあらかじめ創成し、溝の有無によってバンプ上面に対するむしれ、切り屑固着の影響を比較した。比較結果では、バンプの前後いずれのパターンにおいても樹脂の脱落や切り屑の押しならしによる加工面性状の悪化は見られず、良好な切削結果を得ることが確認された。図17はバンプの周囲の段差形状を微細形状測定器を用いて計測した結果を示す。目標となる段差高さ100nm以下に対して、本手法での段差高さはそれぞれ120nmおよび130nmとなり、これまでの最小値である300nmと比べて大幅に段差高さを縮小することが可能となったことが確認された。

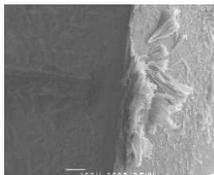


図6 構成刃先例

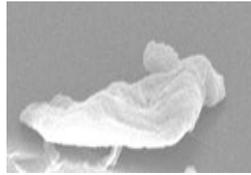
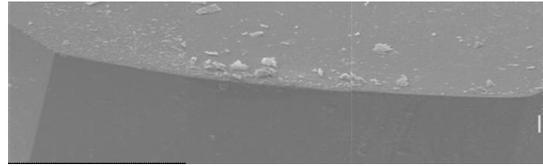
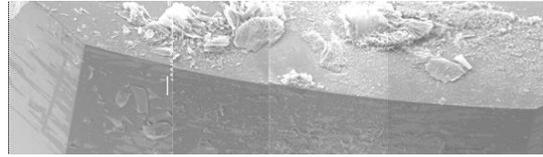


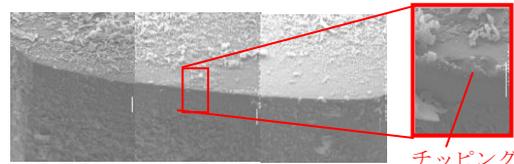
図7 切り屑形状



(A) 低温切削時、チッピング/固着なし
(-14°C、切込深さ5 μ m、1刃送り10 μ m)



(B) アルゴンガス吹き付け時、固着あり
(-14°C、切込深さ5 μ m、1刃送り10 μ m)

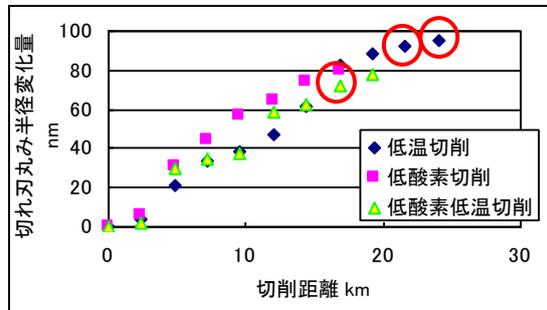


(C) 准低温切削時、固着あり・チッピング発生
(0°C、切込深さ10 μ m、1刃送り10 μ m)

図5 切刃樹脂固着状態(電子顕微鏡撮影)

表2 刃先状態観察結果

		アルゴン		ヘリウム		なし	
		5 μ m	10	5	10	5	10
-14°C	5 μ m	A	-	A	-	A	A
	10	-	-	-	-	-	A
-6°C	5	A	B	B	-	B	B
	10	-	-	-	-	-	A
0°C	5	B	B	B	-	B	B
	10	-	-	-	-	-	C
常温	5	A	B	B	B	C	-
	10	-	B	-	B	-	C



○ チッピング発生箇所

図8 切削総距離に対する切れ刃稜丸み半径変化傾向

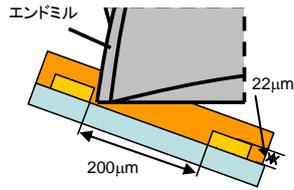


図9 小径エンドミル工具と多軸制御切削による微細溝形状の創生

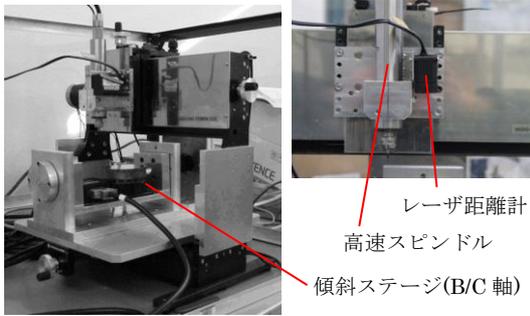


図10 小型多軸制御切削加工専用機

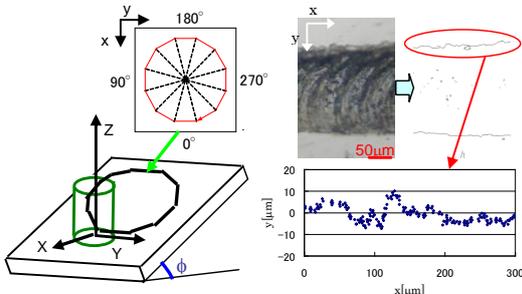
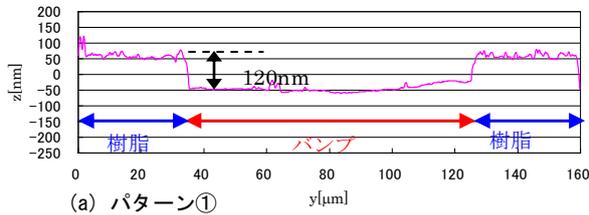


図11 工具姿勢定義

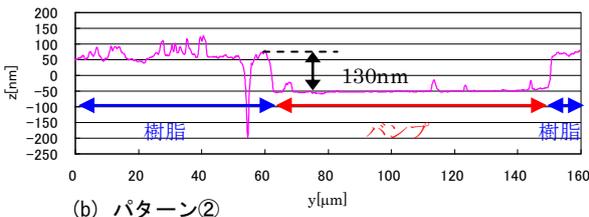
図12 溝形状評価

表3 溝形状端面性状の切削実験条件

工具径	5mm
工具回転数	60,000rpm
送り速度	10mm/min
切込深さ	20μm
加工雰囲気	Dry
工具相対姿勢	$\phi = \{10, 20, 30\}$
傾斜角 ϕ	$\theta = \{0, 30, 60, 90, 120, 150,$
回転角 θ	$180, 210, 240, 270, 300, 330\}$

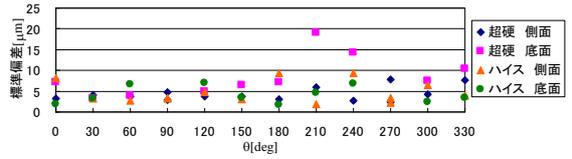


(a) パターン①

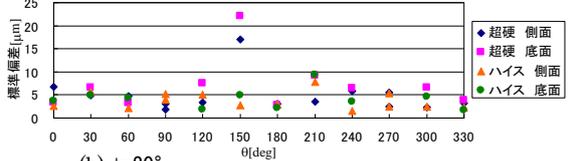


(b) パターン②

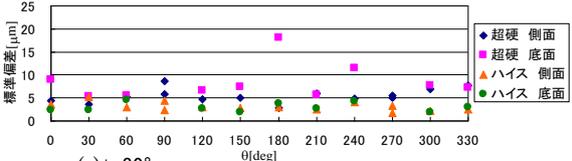
図17 バンプ周辺の段差形状計測結果



(a) $\phi=10^\circ$

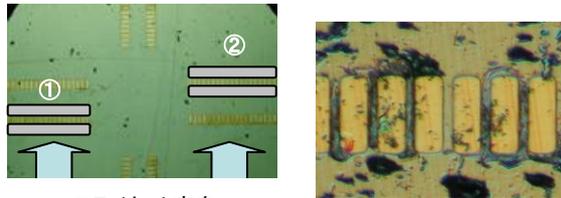


(b) $\phi=20^\circ$



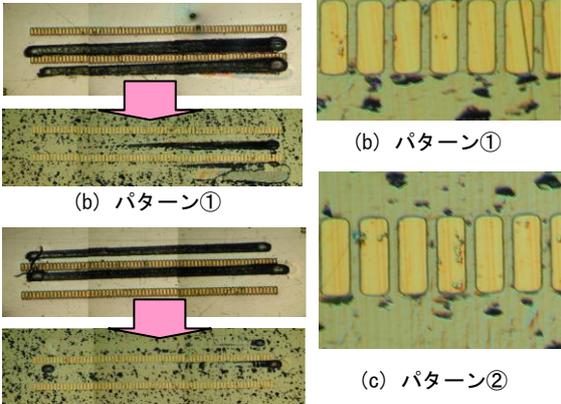
(c) $\phi=30^\circ$

図13 工具種類/相対姿勢条件が溝端面形状に与える影響



フライカット方向

図14 バンプ形状に対する微細溝位置の設定



(a) 溝加工無し

(b) パターン①

(c) パターン②

図16 バンプ周辺状態拡大写真

図15 フライカット前後での加工面状態変化

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 三輪直彦、金子順一、堀尾健一郎、電子基板用プラスチック材料における選択的立体形状切削、第 8 回日本機械学会生産加工・工作機械部門講演会講演論文集、245-246、2010
- ② 三輪直彦、金子順一、堀尾健一郎、電子基板用プラスチック材料における微細溝形状の創成、2011 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集、387-388、2011、11、19~20 岡山大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀尾 健一郎 (HORIO KENICHIRO)

埼玉大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：6 0 2 0 1 7 6 1

(2) 研究分担者

金子 順一 (JUN' ICHI KANEKO)

埼玉大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：8 0 3 7 5 5 8 4