

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 1 日現在

機関番号：12501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011 年～2012 年

課題番号：23656101

研究課題名（和文）AFM 機構による LSI 多重配線層の単一層表出診断法の研究

研究課題名（英文）Development of fault detection/diagnosis method of multi-layered interconnection in LSI circuit by AFM mechanism

研究代表者

森田 昇 (Noboru MORITA)

千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30239660

研究成果の概要（和文）：本研究では、LSI の故障解析手法として、加工用 AFM カンチレバーを用いた多重配線層の単一層除去加工法の可能性を検討した。具体的には、切れ刃先端形状や剛性の異なる加工用カンチレバーを用いて LSI 表面の除去加工を行い、薄層除去加工特性を調査した。その結果、高剛性カンチレバーを使用することにより、 $3.0\ \mu\text{m}$ 以上の加工深さが得られた。また、荷重制御により積層された任意の配線層の表出・観察が可能となり、従来のエッチングや研磨による異常部表出法に比べて信頼性の高い故障解析が可能となった。

研究成果の概要（英文）：A new fault detection/diagnosis method of multi-layered interconnection in LSI circuit was developed using diamond tools attached on AFM cantilevers. The effects of configuration of a cutting edge and stiffness of a cantilever on removal characteristics of a surface thin layer were investigated. As a result, the removed depth of more than $3.0\ \mu\text{m}$ was achieved by utilizing a high stiffness cantilever. And also, the precise control of applied load to cantilever enabled the observation and evaluation of buried wires at intended removed depth. The present study provides more reliable fault detection/diagnosis method than conventional removal methods such as chemical etching and mechanical polishing.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,300,000	690,000	2,990,000

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：ナノ・マイクロ加工

1. 研究開始当初の背景

LSI 回路パターンの故障解析にはエミッション顕微鏡法が用いられる。これは動作状態にある半導体デバイスから出るとごく微弱な光を検出し異常部を特定したのち、SEM 等による検査と原因究明をする手法である。その前処理として、図1に示すようなLSI 回路の多重配線層を段階的に除去・表出させる必要があり、その方法としてエッチング法や研磨法が併用される。

エッチング法では、回路材質を薬液により選択的に除去し、凹凸のある回路パターンで

も表出できるが、回路層ごとに材質と処理条件が異なるため工程が複雑である。研磨法では、平面性を維持した極めて良好な表面が得られるが、微少な研磨量の調整に熟練を要することが課題である。これらの課題を解決する代替技術として、AFM 機構と加工用カンチレバーによるナノスケール機械加工法を新たに提案・開発する。

2. 研究の目的

本研究は、非常に微細で複雑な多層構造を有するLSI 回路の段階的除去・表出法として、

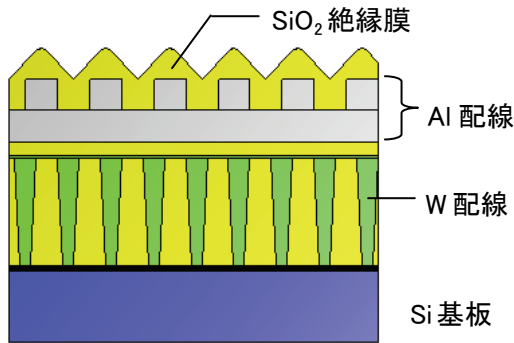


図1 実験に使用したLSI試料の断面図

AFM機構によるLSI 多重配線層の薄層除去加工法の原理を提案・検証するものである。

LSI回路のように、表面に1 μm 以下の微細な凹凸形状を有し、各層で異なる材質で構成された多層微細構造の複合材料に対する微細加工法については従来研究事例が存在しない。無機質材と金属の微構造を有する複合材料としてのLSIのマイクロ・ナノ加工技術を新たに確立し、これとAFM本来の顕微鏡機能を併用してLSI回路の故障診断を達成することを本研究の目的とする。

上記の目標を達成するため、本研究では、次の3つのステップで研究を実施する。各項目の具体的な内容は次項以降で記述する。

- (1) 加工用AFMカンチレバー作製方法の確立
- (2) LSI薄層除去加工に関する検討
- (3) 高能率加工可能なカンチレバーの開発

3. 研究の方法

3.1 加工用AFMカンチレバーの作製

加工用カンチレバーは以下の手順で作製した。

(1) ダイヤモンド切れ刃の作製：単結晶Si(100)に酸化膜を形成し、フォトリソグラフィによって円形にパターニングを行った後、KOH水溶液によって異方性エッチングを行った。これにより{111}面で構成された四角錐型Siモールドが形成された。次にBHFを用いて酸化膜除去を行った後、HF-CVD法により多結晶ダイヤモンドを成膜した。不要箇所のダイヤモンド膜を機械研磨によって除去した後、KOH水溶液によってSiモールドを除去することによって、四角錐型のダイヤモンド切れ刃を分離した。

(2) シリコンカンチレバーの作製：単結晶Si(100)に酸化膜を形成し、フォトリソグラフィによってレバー形状にパターニングを行った後、KOH水溶液によってエッチングを行った。BHFによって酸化膜を除去した後、エポキシ樹脂を用いて石英ガラス基板に装着した。なお、作製したレバー断面は台形であり、台形断面を有する片持ち梁モデルを用いてレバーの剛性を算出した。

このようにして作製したダイヤモンド切

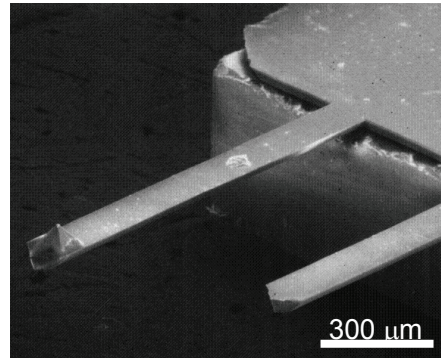


図2 加工用カンチレバー

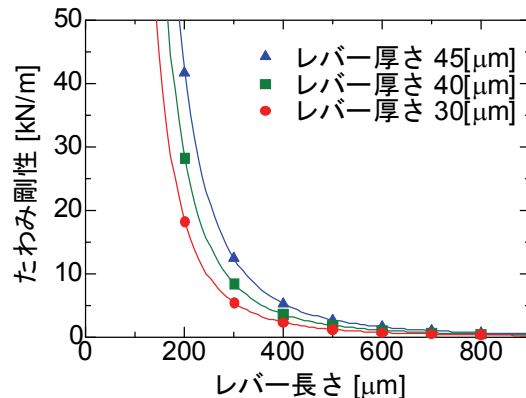


図3 レバー長さとなたわみ剛性の関係

れ刃を、エポキシ樹脂を用いてSiレバー先端に接着することによって、加工用カンチレバーを製作した。

3.2 加工に使用したLSI試料

加工対象となるLSI試料の構造は図1に示した通りである。図1中のSiO₂絶縁膜は高さ626.9 nm、幅1265 nm程度の凹凸形状であり、アルミニウム(Al)配線は表面から743 nm~2.7 μm 、タングステン(W)配線は同じく2.7~6.3 μm の深さに位置している。

4. 研究成果

4.1 LSI薄層除去加工に関する検討

作製した加工用カンチレバーの一例を図2に、また形状の異なるレバーのたわみ剛性を図3に示す。なお、測定用カンチレバーと加工用カンチレバーの交換は容易であり、加工後の試料を直ちに形状測定に供することが可能である。そこで次に、作製した加工用カンチレバーを用いてLSI試料に対して除去加工を試みた。加工条件を表1に示す。

図4(a)は、表1の条件1で加工した時の垂直荷重と加工深さの関係である。この時の最大加工深さは328.8 nmであり、荷重の増加に伴い加工深さは増加した。また、加工回数を変化させた時の加工特性について検討した。図4(b)は、表1の条件2で加工した時の加工回数と加工深さの関係である。加工回数8回

表 1 加工条件

	条件 1	条件 2	条件 3
加工範囲 [μm]	64 x 32	32 x 16	32 x 32
加工速度 [$\mu\text{m/s}$]	128	128	64
ピッチ [nm]	250	125	62.5
たわみ剛性 [N/m]	377.6	1116.3	6100, 19200
荷重 [μN]	526-947	1721	9400, 17200, 27500
加工回数	1	1-24	1

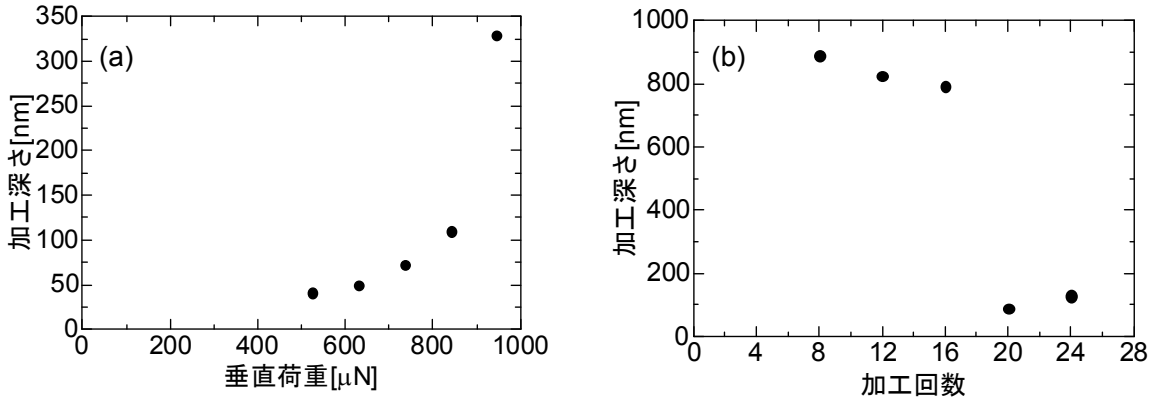


図 4 垂直荷重, 加工回数と加工深さの関係

で最大加工深さ 890 nm となり. その後加工深さは減少した. 加工後の切れ刃先端を SEM で観察すると摩耗しており, 加工深さの減少は加工距離の増加による工具摩耗が主因であると考えられる. また, 凹凸を有する表面形状により, 平滑な加工面が得られず, 図 4 の加工深さではいずれも配線パターンを確認できなかった. そのため, μN オーダーの低荷重域では, 得られる加工深さや摩耗の点より, 目的とする層までの加工は困難であることがわかった.

そこで, 低荷重域の加工での問題点を再検討し, 表 1 の条件 3 のように加工条件を設定した. 表面形状の影響を低減し, mN オーダーの高荷重域で加工を行えるように, 剛性の高い加工用カンチレバーを使用した. また工具摩耗の影響が少なく, 可能な限り広範囲での加工と観察が可能な加工条件を採用した. 図 5 は, この条件で加工した時の各荷重における加工部の SEM 観察像である. この図から LSI の表面からの深さに対応した様々な形状を確認することができ, 荷重変化によって加工深さが大きく増加することがわかった. 加工深さと LSI の配線構造から, 図 5 (a) は表面層近くの Al 配線と 2 層目の Al 配線, 図 5 (b) は 2 層目の Al 配線, 図 5 (c) は 2 層目の Al 配線及び下層に存在する W 配線であると考えられる. また加工部の底面は, 表面よりも凹凸が小さく, 表面形状の影響を低減することができた. 切れ刃先端を SEM で観察すると, 低荷重時の加工距離が長い切れ刃よりも

摩耗が進んでいたが, 低荷重時に見られたような加工深さの急激な減少は見られず, 工具摩耗の影響を低減することができたと考えられる.

4.2 高能率加工可能なカンチレバーの開発

上記で得られた知見に基づき, 加工能率の向上を目的として, 以下の 2 種類の高能率加工用カンチレバーを製作した.

(1) 複数のチップ群が 1 本のレバーに装着された多刃カンチレバーの製作: 図 6 (a) は, 製作した多刃カンチレバーである. レバー先端に 5 つの四角錐形状のダイヤモンド切れ刃が規則正しく並んでいることが観察された. 作製した加工用 AFM 多刃カンチレバーを AFM に装着し, 加工性を評価した. 被削材は Ni-P めっきである. 荷重は 1720 μN 一定とし, 加工方向をレバー長手方向とした. 図 6 (b) は, 製作した多刃カンチレバーを用いて加工を行った加工溝の SEM 観察像である. 図より, レバーに 5 つの切れ刃があるにもかかわらず, 3 つの切れ刃しか加工に寄与していないことがわかる. これは, 5 つの切れ刃中, 両端の切れ刃の高さが中央のものよりも低いためと考えられる. ここでは示していないが, 加工箇所のオーバーラップや加工ピッチの調整により, 加工面積や加工深さの増加を図ることが可能となった.

(2) たわみ剛性の異なるレバーを複数本有するマルチカンチレバーの製作: 図 7 (a) は, 製作したマルチカンチレバーである. このカンチレ

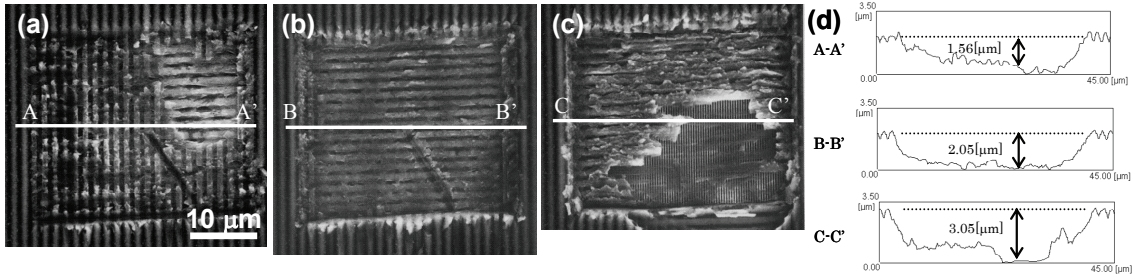


図5 垂直荷重を変化させた場合の加工部のSEM観察像. (a) 9.4, (b) 17.2, (c) 27.5 mN, (d) 各断面のプロファイル.

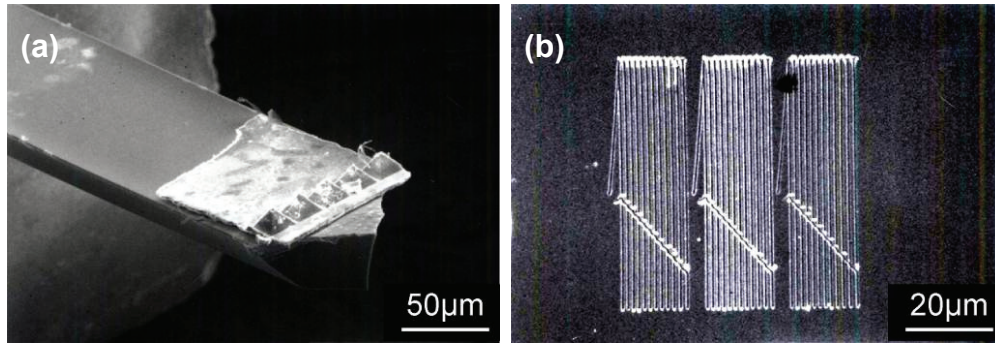


図6 加工用多刃カンチレバー(a)と加工結果(b)

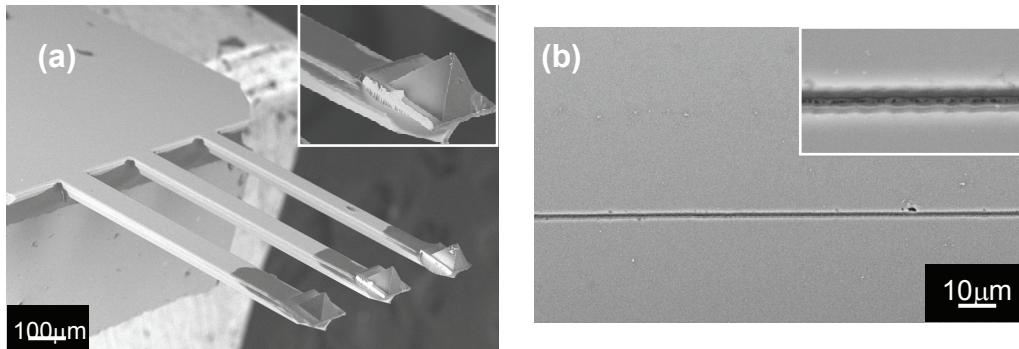


図7 加工用マルチカンチレバー(a)と重畳加工結果(b)

バーは、たわみ剛性の異なるレバーを3本具備しており、剛性の高いレバーから低いレバーへと重畳加工することにより、粗加工から仕上げ加工を一度に実現するものである。レバーの幅は、110 μm, 90 μm, 70 μmで長さはすべて1000 μmである。切れ刃配列の整っているダイヤモンドアレイ工具から複数の切れ刃を有する切れ刃列をYAGレーザー加工機により抽出し、レバーに装着後、不要部分を集束イオンビーム加工機により除去することで、高精度なマルチカンチレバーを作製することができた。そこで、単結晶シリコンを被削材として、たわみ剛性の高いレバーから低いレバーへと重畳加工を行った。重畳加工は、ステージを0.25°傾斜させ、レバー長手方向と垂直方向に走査することで、徐々に加工溝が深くなっていた。図7(b)は、重畳加工実験で得られた加工溝のSEM観察像である。この図から、たわみ剛性の異なる各レバーで一

度に加工することによって、単一レバーによる加工溝と比べて、良好な加工溝が得られることがわかった。

4.3 まとめと今後の課題

本研究では、微細で複雑な多層構造を有するLSI回路の故障解析手法として、加工用AFMカンチレバーによる単一層の除去加工を行い、その診断法の可能性を検証した。その結果、多層微細構造の複合材料の微細加工特性や高精度加工における課題と問題点を明らかにすることができた。特に、凹凸を有し硬度の異なる表面をカンチレバー方式で切削加工した場合、切削表面の平坦度を高精度に確保することが難しいことがわかった。今後は、既に開発済みのナノ加工計測システムに搭載した高速・高精度ミリング機構を併用して予め平坦化加工を行った後、加工用カンチレバーによる局所的微細加工を適用す

ることを検討する予定である。

なお、本研究の成果は「LSI の故障解析手法」のみならず、微細構造をもつ多層複合素材の 3 次元マイクロ・ナノ加工技術として、例えば大面積液晶マスクのリペア技術、多結晶シリコン系ソーラーセルのリサイクル技術、LSI 規格外品のテストウェーハあるいはソーラーセルへの再生技術、レアメタルの回収技術など多大の経済効果が見込める技術分野への横展開の可能性も期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕なし

〔学会発表〕なし

〔図書〕なし

〔産業財産権〕なし

〔その他〕

ホームページ

<https://sites.google.com/a/cats-lab.com/www/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

森田 昇 (Noboru MORITA)

千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30239660

(2)研究分担者

比田井 洋史 (Hirofumi HIDAI)

千葉大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：61313334

松坂 壮太 (Souta MATSUSAKA)

千葉大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：30334171

(3)連携研究者

なし