

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630144

研究課題名(和文)結晶配向制御による低弾性率マイクロバンプ形成手法の開発

研究課題名(英文) Fabrication of low-elastic modulus micro bumps by controlling crystallographic orientation

研究代表者

鈴木 研 (Suzuki, Ken)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40396461

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：三次元半導体実装用金属バンプに用いられる銅はヤング率が結晶方位によって異なる材料である。本研究では、実装構造内残留応力低減のため、ヤング率が最も低い(100)面に配向した銅バンプ作製を可能とするめっき条件、下地材料の探索を行った。(001)面配向の-Taバリア層上に銅シード層を形成しめっき成膜した銅薄膜で(100)面配向の増加を確認した。このめっき銅薄膜のヤング率をナノインデンテーション試験により評価したところ、(111)面配向単結晶銅より約20 GPaも小さいヤング率(平均127 GPa)を得た。以上より、結晶方位を制御しためっき銅バンプの作製による低ヤング率化の実現可能性を実証した。

研究成果の概要(英文)：In this study, the fabrication method of low-elastic modulus micro Cu bumps with (100) crystallographic orientation was studied for reducing the thermal and residual stresses in three-dimensional (3D) integration of silicon microelectronic devices. Crystallographic orientation and quality of the atomic arrangement of the electroplated thin films were measured by XRD (X-ray diffraction) analysis and EBSD (Electron Back Scattering Diffraction) method. All the electroplated samples formed on the -Ta/Cu base layer are oriented (111) preferentially. However, the ratio of (100) orientation in an electroplated Cu film was increased by applying -Ta/Cu base layer. Young's modulus of the film were measured by Nano-Indentation test and Young's modulus of the film with (100) orientation decreased to 127 GPa from 145 GPa in the (111) oriented film. Therefore, the low-elastic modulus Cu micro bumps should be realized by using -Ta/Cu base layer for the Cu electroplating.

研究分野：信頼性設計

キーワード：マイクロバンプ 銅 電界めっき 三次元実装 機械特性

### 1. 研究開始当初の背景

近年、半導体チップの微細化に限界が近づきつつある中で、シリコン貫通配線(Through Silicon Via: TSV)と銅や金など金属製の突起状端子(バンプ)を用いてチップを積層し、接続する三次元半導体実装技術の重要性が高まっている。機能別に分割したチップを短距離かつ多端子で接続できるためシステムの性能や消費電力を大幅に改善することが可能であるが、解決すべき技術的課題も多く、特に積層接合技術の低コスト化、歩留まりや信頼性の向上が求められている。

TSV、バンプを用いた三次元実装構造の信頼性低下要因の一つに実装時に増大する残留応力、局所変形が挙げられる。チップを積層した三次元実装構造ではチップ及び半導体パッケージが線膨張係数の異なる多くの材料で構成されるため、実装時に物性差に起因した熱残留応力が発生する。特に、バンプとバンプ間に充填された樹脂材(アンダーフィル)の弾性率(ヤング率)、線膨張係数の差が大きいため、熱硬化時や使用中の温度変化によってバンプ接続部近傍に局所的に高い熱応力や変形が発生し、シリコンチップ割れ、配線の剥離、トランジスタの特性変動など様々な不良の直接的原因となっている。

加えて、製品の微細化に伴い配線やバンプがマイクロ・ナノスケールに到達してくると、製造方法に依存して結晶粒径、結晶配向性、欠陥密度など結晶組織が多様化するため、強異方性で構造敏感な性質が顕在化し、材料内および材料間に強度物性の分布が発現する。特にめっき法によって作製される銅バンプでは、めっき条件やめっき後のプロセスによって微細組織が大きく変化し、降伏応力やヤング率などの強度物性がばらつく傾向があるためチップ間の積層・接合信頼性の低下が懸念される。したがって、信頼性の高い三次元実装の実現には、バンプとアンダーフィルとの物性差を低減すること、バンプ個々の物性ばらつきを減少させることが必須である。

### 2. 研究の目的

本研究では、低応力高信頼三次元半導体実装に向けた基礎技術の構築を目的とし、バンプ/アンダーフィルの物性差に起因する残留応力・局所変形の低減および強度物性ばらつきを低減を可能とする、結晶方位を制御しためっき銅バンプ作製手法の確立を目指す。具体的には、めっき銅薄膜の機械特性分布広がり支配因子を明らかにするとともに、ヤング率が最も低い(100)配向を有するめっき銅バンプ作製による低ヤング率化の実現可能性について検討する。

### 3. 研究の方法

めっき法でシリコンウエハ上に作製した銅薄膜は下地層(拡散バリア層及びめっきシード層)の堆積法、めっき条件、熱履歴などの製造プロセス条件に依存して、微細結晶組織及び強度物性に多様な分布広がりを発現する。とりわけめっき膜界面の初期エピタキ

シャル成長層は下地材であるシード層表面の結晶構造や格子定数、結晶配向性などに著しく依存して原子配列が決定され、めっき膜の微細組織に著しい影響を与える。本研究では、シリコンウエハ上に酸化膜を形成した後、バリア層およびシード層としてTaとCuを電子ビーム(Electron Beam: EB)蒸着法、または高周波スパッタリング法を用いて室温で連続堆積させた。EB蒸着法は電子ビームをターゲット材料に照射し、局所加熱によって蒸発したターゲット原子が基板に堆積する手法で、高温原子が基板上で拡散し薄膜が堆積するため、良好な膜質が得られやすい。一方、スパッタ法はArなどの不活性物質をターゲットに衝突させ、叩き出された粒子が大きなエネルギーを持って基板に堆積していくため、熱力学的に非平衡状態での堆積プロセスとなっている。したがって成膜手法が異なるTa/Cu下地層では、残留ひずみ、欠陥密度、結晶配向性など微細組織が異なることが予想される。Taバリア層とCuシード層の厚さはそれぞれ50 nm、150 nmとした。

下地層成膜後、直流電流10、50 mA/cm<sup>2</sup>でウエハ上にめっき銅薄膜を5 μm成膜した。めっき液は純水779 g/l、硫酸157 g/l、酸化銅64 g/lを混合させたもので、他の添加剤等は一切加えてはいない。作製したサンプルの一部は、Arガス中400°Cで30分間熱処理を行った。めっき銅薄膜の結晶配向性をX線回折(X-Ray Diffraction: XRD)および電子線後方散乱回折(Electron Back Scattering Diffraction: EBSD)法により、ヤング率をナノインデンテーション試験により評価した。

### 4. 研究成果

(1)めっき銅薄膜組織の下地成膜手法及びめっき条件依存性

X線回折による下地層の膜法線方向の結晶構造解析(X線源: Cu-Kα線、加速電圧: 40 kV、エミッション電流: 30 mA)の結果を図1、2に示す。図1よりEB法を用いて成膜した下地層では明確なCu(111)面の回折ピークが見られるのに対し、図2に示すスパッタ法で成膜した下地層ではCu(111)面からの回折強度がSiやTaの回折ピークよりも弱いことが確認できる。これよりスパッタ法による銅シード層は微細な結晶粒で構成された膜であると考えられる。さらにスパッタ法で作製したバリア層はEB法のバリア層とは異なり、体心立方構造をもつα-Taではなく正方晶系のβ-Taが堆積していることが分かる。このように、下地層の結晶構造や結晶性が成膜方法に依存して変化することが明らかとなった。

図3、4に電流密度10 mA/cm<sup>2</sup>で成膜しためっき銅薄膜のXRD回折パターンを示す。下地層成膜方法が異なっても、めっき銅薄膜は(111)面の回折強度が強くとして(111)面配向を示した。特にEBシード層上の膜は(200)面の回折ピークが弱く、(111)強配向性を示していることから、シード層に対して整合成長(エピタキシャル成長)していると

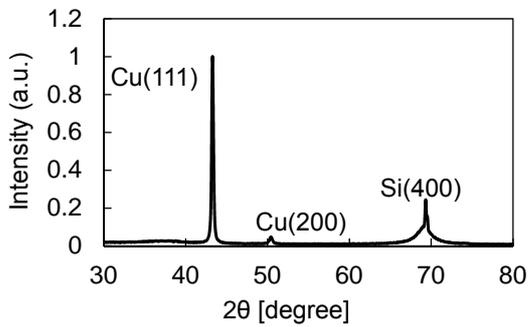


図1 めっきシード層の結晶配向性(EB 蒸着法)

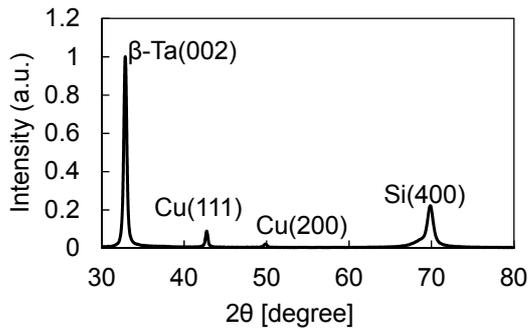


図2 めっきシード層の結晶配向性(スパッタ法)

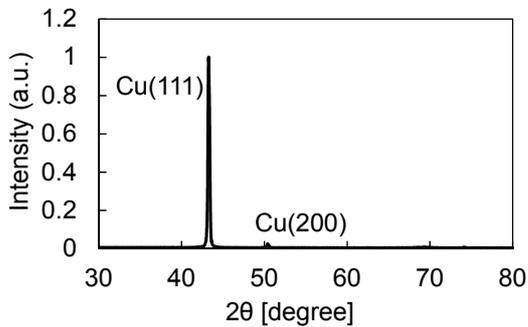


図3 EB 下地層めっき膜の結晶配向性

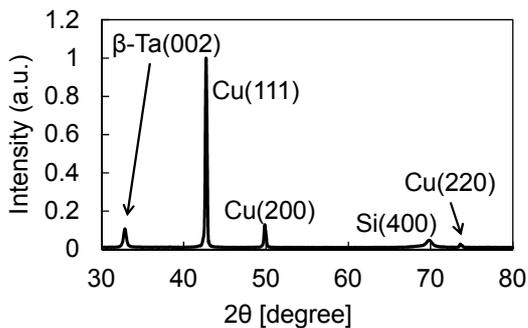


図4 スパッタ下地層めっき膜の結晶配向性

考えられる．この傾向は  $50 \text{ mA/cm}^2$  でも同様であった．一方，スパッタシード層上のめっき膜では Cu(111)面が主配向であるものの，Cu(200)，(220)面の回折ピークも見られる． $50 \text{ mA/cm}^2$  で成膜しためっき膜でも同様に，(200)，(220)面の回折ピーク強度は EB シード上のそれよりも大きくなっていった．一方，表 1 に示す(111)面の半値幅(Full Width at Half Maximum: FWHM)については，めっき直後の銅薄膜では下地層やめっき時電流密度に

表 1 各めっき銅薄膜の Cu(111)面の半値幅

Seed method	Cu seed layer	Electroplated Cu			
		$10 \text{ mA/cm}^2$		$50 \text{ mA/cm}^2$	
		As	Anneal	As	Anneal
EB	0.26	0.26	0.24	0.29	0.25
Sputter	0.37	0.26	0.20	0.25	0.19

[degree]

よっての差異はほとんど見られなかった．これに対し熱処理後のめっき銅薄膜では，熱処理により全ての銅薄膜で半値幅が減少したものの，その減少幅は下地層やめっき時電流密度によって異なっていた．総じてスパッタ下地のめっき膜の方が EB 下地めっき膜よりも半値幅の減少が顕著であり，めっき銅薄膜の再結晶や粗大化の程度が下地層やめっき条件によって異なることが確認された．以上の結果より，めっき銅薄膜の結晶配向性，残留応力(ひずみ)や転位密度など，結晶品質が下地層の微細組織やめっき条件に依存して変化することが確認された．

#### (2) Cu(100)面配向によるめっき銅薄膜低弾性率化の検討

図 3, 4 に示すように EB 法またはスパッタ法で作製した下地層上には(111)面強配向のめっき膜が堆積し，(100)面配向はわずかであった．これは Cu シード層が主として(111)配向であったためと考えられる．(100)面配向のめっき銅薄膜を得るためには Cu シード層が(100)配向を有する必要がある．そこで，スパッタ法で成膜した(200)面配向のβ-Ta 上に EB 法で成膜した Cu シード層からなる下地層を用いてめっき銅薄膜の(100)面配向化を試みた．スパッタ法で形成される β-Ta の格子定数( $10.21 \text{ \AA}$ )が Cu の格子定数( $2.56 \text{ \AA}$ )と整数倍(4 倍)の関係にあるため成膜条件によってはβ-Ta 上に Cu(100)面が成長する可能性がある．そこでスパッタ法よりもエピタキシャルな関係で堆積しやすいと考えられる EB 法を用いてβ-Ta 上に Cu シード層を成膜した．

図 5 にβ-Ta/Cu シード (Ta: スパッタ法, Cu: EB 法) 上に成膜しためっき銅薄膜 (電流密度  $10 \text{ mA/cm}^2$ , 熱処理) の X 線回折パターンを示す．Cu(100)の完全強配向ではないものの，図 3, 4 と比較し Cu(200)ピークが著しく増加していることが確認できる．これは図 6 に示した Cu シード層の IPF(Inverse Pole Figure)マップからも確認できるように，シード層における(111)面の割合が減少し，(110)および(100)面の配向割合が増加したためと考えられる．

めっき銅薄膜の(100)配向による低弾性化の可能性を検証するため作製しためっき銅薄膜試験片にナノインデンテーション試験を行い，ヤング率を測定した．試験片薄膜内から  $10 \mu\text{m}$  四方の領域を 3 箇所選択し，それぞれの領域に対して  $5 \mu\text{m}$  ピッチ， $3 \times 3$  の 9 点インデンテーション試験を行った．試験片表面粗さがナノインデンテーション試験に

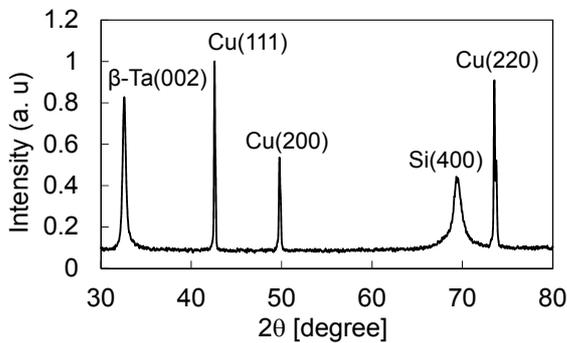


図5 β-Ta/Cu シード (Ta:スパッタ法, Cu:EB法) めっき膜の結晶配向性

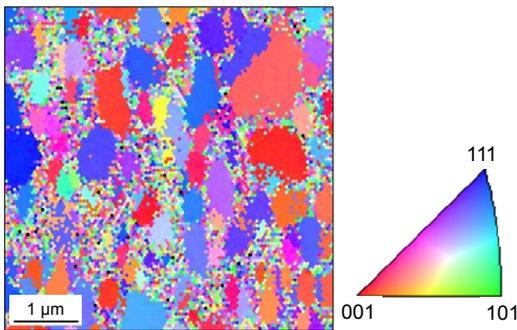


図6 β-Ta/Cu シード層の IPF マップ

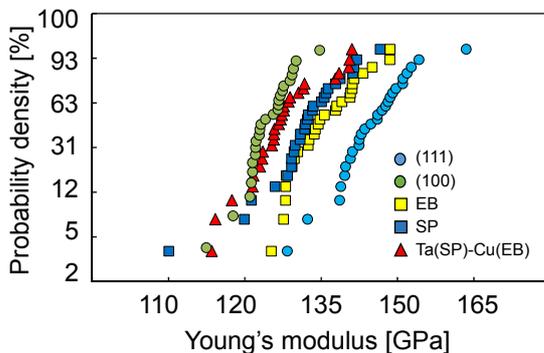


図7 ヤング率の分布広がり

おける測定誤差要因となるため、試験片表面はアルミナペーストによる機械研磨を施した後、コロイダルシリカを用いて平坦化した。

図7に(111)強配向であったEB下地層(EB)、スパッタ下地層(SP)めっき銅薄膜とβ-Ta/Cu (Ta:スパッタ法, Cu:EB法)下地層めっき銅薄膜のヤング率のワイブルプロットを示す。図にはめっき銅薄膜におけるヤング率分布の参照データとするため、膜厚方向の結晶方位が(111)面および(100)面の単結晶銅の結果も合わせて示した。めっき銅薄膜では下地層やめっき条件などによって、ヤング率が約110~150 GPaの間で分布広がりを発現していることがわかる。(111)配向のEB、スパッタ下地層めっき銅薄膜とβ-Ta/Cu下地層めっき銅薄膜の分布を比較すると、β-Ta/Cu下地層めっき銅薄膜で低ヤング率側にシフトしていることがわかる。平均ヤング率(50%ヤング率)を比較すると最も大きいEB下地層めっき銅薄膜の135 GPaに対し、β-Ta/Cu下地層めっき銅薄膜では127 GPaと10 GPa

以上ヤング率が低下した。また、このヤング率は(100)単結晶の平均ヤング率(125 GPa)と同等であり、(111)単結晶の平均ヤング率(145 GPa)より約20 GPaほど小さいことから、β-Ta/Cu下地層めっき銅薄膜の低ヤング率化は(100)面配向の増加によるものと考えられる。以上の結果より、結晶方位を制御しためっき銅の作製により、銅バンプの低ヤング率化の実現可能性を実証した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

M. Gotoh, K. Suzuki, H. Miura, "Improvement of Thermal Conductivity of Electroplated Copper Interconnections by Controlling Their Crystallinity", Proceedings of International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems (InterPACK2015), 査読有, InterPACK2015-48197, (2015), DOI: 10.1115/IPACK2015-48197

〔学会発表〕(計 6 件)

Masaru Gotoh, Ken Suzuki and Hideo Miura, "Micro-Texture Dependence of the Strength of Electroplated Copper Fine Bumps Used for 3-Dimensional Integration", INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOLID STATE DEVICES AND MATERIALS (ssdm2015), USB&DVD, PS-2-4, pp.54-55, (Sapporo Convention Center, Sapporo, Hokkaido, September 27-30, 2015)

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

鈴木 研 (Suzuki Ken)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号: 40396461