

チン テントウ

氏 名	CHEN CHUANTONG
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博第1060号
学位授与の日付	平成28年9月7日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学位論文題目	Fracture Mechanics Evaluation of Cu/SiN Interface Adhesion Strength in the Multilayer Thin Film Structure of LSI Interconnects (集積回路内部多層薄膜配線構造におけるCu/SiN界面密着強度の破壊力学的評価)
論文審査委員	主 査 教授 神谷 庄司 教授 渡邊 義見 准教授 佐藤 尚 特任研究員 中村 友二 (株) 富士通研究所

論文内容の要旨

Recently, large scale integrated circuit (LSI) uses electrodeposited copper thin films as an interconnect material to be further miniaturized to submicron scales for faster operation and more functionality. While those Cu films compose multilayered structures, the weak adhesion strength of interfaces between Cu and insulation layers has become one of the important issues for interconnect reliability. The weak adhesion strength not only causes delamination during the manufacturing process but also leads to poor electro-migration resistance, which sometimes brings about fatal malfunction of the device. On the other hand, since the interconnect structure in LSI typically has sub-micron dimensions, interface strength may significantly depends on locally inhomogeneous material structure. For instance, interface strength on the microscale Cu layer may be influenced by the different deformation behavior caused by different grain orientations. In addition, the plastic deformation behavior may be strongly affected by not only the size but also the microscopic structure.

In this study, firstly, a new evaluation method of interface strength was designed and applied from the viewpoint of plastic zone at the interface crack tip with different specimen size. By considering the influence of the plastic zone at the interface crack tip with the

10x10 μm , 5x5 μm and 1x1 μm specimens by means of an elastic-plastic finite element simulation technique, interface bonding energy was evaluated and almost equal among all types of specimens. Since the average grain size of Cu lines was much smaller than the specimen dimensions, no significant difference should be expected in bonding energy. On the other hand, the fluctuation of the evaluated interface strength tends to be larger with the decreasing specimen size. The local interface strength may significantly varies depending on local grain distribution in the Cu interconnect structure. It was also concluded that an accurate estimation of the plastic zone is essential for micro-scale specimen evaluation. The new method provided an accurate evaluation tool for the reliability issues of interface strength in Cu metallization systems in LSI.

Secondly, it was successfully demonstrated that the significant fluctuation of strength of interface Cu/SiN in LSI interconnects was induced by the inhomogeneous grain structure of Cu line by comparing the result of strength distribution with that of the Cu/SiN interface on a homogeneous Cu layer. In addition, the deformation behavior of Cu line for different specimens were investigated and the results revealed that the fluctuation of interface strength was influenced by the different plastic deformation behaviors caused by different grain structure in LSI interconnect. It was demonstrated that potential fracture in LSI interconnects originate from the weak point which depends on the microscopic material structure of Cu line.

Finally, in order to remove the limitation on the freedom of grain orientation in the experiment on Cu line and further investigate the fluctuation of interface strength, bonding energy of interface between Cu and SiN was evaluated on single crystal Cu substrates with different surface orientations and in different loading directions. With the aid of computational simulation of elastic-plastic interface crack extension process, it was newly revealed that the bonding energy depends only on the surface crystal orientation of Cu and that interface strength changed in different loading direction even on the same surface orientation through the different deformation behavior of Cu substrate caused by elastic-plastic anisotropy. In addition, the fluctuation of interface strength covering the entire range of crystal orientations and loading directions was expected to obtain through the crack extension simulations in LSI.

After accumulating these new findings, this study provides not only a possibility to make a map of local strength distribution but also toward a systematic design scheme on the basis of mechanical engineering and thus to enhance the mechanical reliability brought into LSI interconnect structures.

論文審査結果の要旨

薄膜の堆積・パタニング等を繰返して製造される電子デバイス中には、多くの金属/絶縁体界面が存在するが、これらの界面が脆弱な場合には製造や使用の過程で剥離が発生し、製造時の歩留りや製品の信頼性の低下を引き起こす。この問題を克服するためには界面の付着強度の評価が重要な課題となるが、近年著しく小型化が進んだ構成部材の寸法に対応可能な評価手法の整備は大きく立ち遅れていた。これに対して本学位論文では、従前の界面強度評価手法の一つを拡張整備し、電子顕微鏡内での微小領域の破壊試験にまでも対応可能な新しい方法論を提案している。特に近年サブミクロンスケールにまで微細化された大規模集積回路中の銅配線構造を具体的な対象例として、新規方法論の有用性の検証を多角的に行っており、微小領域での強度評価技術の開拓のみならず、得られた評価結果が示唆する強度上の新たな問題点の発掘という観点からも、学術的価値が高い。内容は以下の全5章から構成されている。

第1章は本論文の序章であり、微細化された電子デバイスが抱える界面強度の問題と従前多数提案された評価方法の特質が、研究の背景として解説されている。ここではさらに、微小領域での界面強度評価に対する適用性という観点から評価法の候補を絞り、解決すべき課題の指摘がなされている。

第2章では、まず $10\mu\text{m}$ 四方から $1\mu\text{m}$ 四方までの異なる寸法の試験片に対して第1章で選定された方法論を適用し、評価結果に見かけの寸法効果が現れることを指摘している。一方、試験片の破壊過程における銅の塑性変形を数値シミュレーションにより正確に評価して、新たに界面の分離のみに必要なエネルギー（界面結合エネルギー）を抽出評価した結果、界面結合エネルギーが寸法によらずほぼ一定となる結果を見出した。これらは、微小領域の界面強度評価において新規かつ重要な知見である。

第2章の結果において試験片の寸法が小さいほど評価値のばらつきが大きかった事実を受けて、続く第3章ではその原因の解明を行っている。評価対象として用いた銅配線は多結晶であったが、新たに単結晶基板の上に絶縁層を形成して同様の強度評価を行った結果、均一な界面強度が得られた。このことは、第2章の結果に見られた強度の顕著なばらつきが異なる結晶方位に起因するものであることを証明しており、機械として設計される構造の寸法がそれを構成する材料の内部構造の寸法と同程度となる場合の強度の一般的特徴として、極めて有益な情報を与えている。

第4章では、第3章において試みられた単結晶基板を用いた強度特性の把握という方法論を更に拡張し、表面の結晶方位が異なる複数の単結晶基板を用いることで、界面における結晶の面方位と破壊時の荷重方向との組合せで現れる、界面強度の分布を推測することを試みている。この結果、界面結合エネルギーが荷重方向に依存せず面方位によってのみ決まること、さらに銅の変形特性の異方性が見かけの強度に強く影響すること等の多くの新規知見を得ている。この方法論は、微細かつ複雑な構造を持つ電子デバイスの強度特性を把握する上で有用性が高く、今後のデバイスの強度信頼性を考える上でさらなる展開が期待される。

第5章は本論文の結言であり、第2章から第4章までにおいて検討された新しい方法論とそこで得られた新規知見の総括、さらにそれらが持つ今後の可能性がまとめられている。

以上本論文は、小型化著しい電子デバイス中の金属/絶縁層界面の実寸法評価という機械工学上の課題に正面から取り組み、斬新な方法論の開拓とその有用性の検証に加えて、それにより得られた強度上の新たな知見とをまとめたものであり、博士論文として十分な価値を有すると判断される。