J211022

銅結晶塑性に起因する Cu/SiN 界面じん性値の異方性

陳傳彤^{*1}, 宍戸信之^{*2}, 小岩康三^{*2}, 神谷庄司^{*2}, 大宮正毅^{*3}, 佐藤尚^{*2},
西田政弘^{*2}, 鈴木貴志^{*4}, 中村友二^{*4}, 鈴木俊明^{*5}, 野久尾毅^{*5}

Anisotropy of Cu/SiN interface toughness induced by copper crystal plasticity

Chuantong CHEN^{*1}, Nobuyuki SHISHIDO, Kozo KOIWA, Shoji KAMIYA,
Masaki OMIYA, Hisashi SATO, Masahiro NISHIDA, Takashi SUZUKI, Tomoji NAKAMURA,
Toshiaki SUZUKI, Takeshi NOKUO^{*1} Department of Mechanical Engineering, Nagoya Institute of Technology,
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466-8555, Japan

Interface adhesion strength was evaluated for the interface between SiN layer and Cu single crystal substrate with surface orientation (110) with specimens of $1 \times 1 \mu\text{m}$ in-plane dimensions. The effect of anisotropy of crystal plasticity on interface adhesion strength was investigated by means of evaluate the interface adhesion energy with the angle between load and slip directions in the (110) plane for the case 0° and 90° . The maximum load measured in the fracture test was employed in 3D elastic-plastic crack extension simulation and interface adhesion energy was obtained for the two cases. The different crack extension behavior along the Cu/SiN interface for the two cases suggested that local interface strength significantly depend on the anisotropy of crystal plasticity.

Key Words : Local Interface Adhesion Strength, Crystal Plasticity, Anisotropy, LSI Interconnect.

1. 緒 言

電気特性の高性能化, 微細化が急速に進展するLSI (大規模集積回路) の配線技術においては, 内部の配線用材料は銅薄膜へと変わり, 配線製造方法も大幅に変化した。ただし, 微細化された内部構造の材料的・界面的な物理的性質は十分に把握されているとはいいがたく, 特に弱いとされる銅薄膜配線とキャップ層間が製造過程や使用時の応力によってはく離することがよく報告される。そのため, 界面付着強度の定量的な評価が半導体デバイスの機械的信頼性の確保に向けた大きな課題とされる。

また, 最新鋭プロセスのトランジスタゲート長や配線間隔の構造寸法は金属材料組織の微視構造と同スケールとなっているため, 材料の不均質性を直接反映した機械特性評価が信頼性確保には重要とされる。LSI 内部構造にCu配線の結晶組織に起因した局所的な界面付着強度のばらつきが存在している報告の例もあり⁽¹⁾, 同じ結晶方位としても界面付着強度のばらつきが現れた⁽²⁾。そのばらつきの原因としてはCu結晶のすべり方向に対して界面塑性変形の異方性が影響していることが考えられる。

そこで本研究では, Cu 単結晶(110)基板上に試験片を作製し, その破壊試験と三次元弾塑性界面き裂進展シミュレーションを用いたCu/SiN界面における局所界面付着強度評価を行うことで, 銅の結晶塑性に起因する界面付着強度分布の塑性変形の異方性について検討した。

^{*1} 正員, 名古屋工業大学 (〒466-8555, 名古屋市昭和区御器所町)。

^{*2} 正員, 名古屋工業大学, JST。

^{*3} 正員, 慶應義塾大学, JST。

^{*4} 非会員, 富士通研究所。

^{*5} 非会員, 日本電子株式会社, JST。

E-mail: 22516505@stn.nitech.ac.jp

Fig.1 Specimen structure (a) and fabrication process (b)

Fig.2 Photograph of FIB-SEM dual-beam microscope

Fig.3 Specimens before (a) and after (b) in the fracture test

Fig.4 Maximum fracture load at the case of 0° and 90° between load and directions

2. 試験片構造と破壊試験

図 1(a)に試料の構造を示す. 結晶方位(110)の Cu 単結晶の基板の酸化膜を NH_3 プラズマ CVD で除去した後に, PECVD により SiN キャップ層および SiO_2 層を形成した構造となっている. 図 1(b)のように構造上部の SiO_2 , SiN 層を集束イオンビーム (FIB) で取り除くことで $1\text{ }\mu\text{m}$ 角の試験片を加工した. また, Cu 単結晶(110)面内に結晶の塑性異方性の影響を検討するため, 結晶(110)面に平行な一つのすべり方向に対して荷重方向との角度が 0° , 90° の試験片を作製した. 図 2 に示すような複合ビーム装置内部に入れ込んだナノインデントを用いて, 先端曲率半径 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ の円錐状のダイヤモンド圧子で水平方向から試験片の側面に荷重を加えることで, 試験片をはく離させた. 最大荷重に達した後, 試験片がはく離し, 加えた荷重がゼロになる⁽³⁾. 図 3 は $1\text{ }\mu\text{m}$ 角の試験片のはく離前後の様子である. はく離した表面をオージェ電子分光法 (AES) により分析することで, はく離界面が Cu/SiN 界面であることを確認した. Cu 結晶のすべり方向と荷重方向 0° , 90° の試験片のはく離荷重を図 4 に示す. すべり方向と荷重方向の角度が 0° の場合のはく離荷重が 90° のより少し大きいことを見出した.

3. 界面付着強度の評価

本研究では, 有限要素プログラムである ABAQUS6.10-2 を用いてユーザーサブルーチン⁽⁴⁾により Cu 結晶塑性特性を導入し, 三次元弾塑性き裂進展シミュレーション⁽⁵⁾を行った. 用いた三次元弾塑性有限要素モデルを図 5 に示す. Cu 単結晶の材料特性については, インデンテーション試験によって弾性係数, 降伏応力を求めることで, 算出された応力-ひずみ関係を適用した. 他の構成材料は等方性であり, 材料定数を表 1 に示す. また, ダイヤモンド圧子の変位を制御することにより, 実験で得られた試験片にはく離荷重を与えて, 節点をはく離することによってき裂進展させ, 全エネルギー法を用いて界面付着強度を評価する.

Fig.5 FE model for 3D crack extension simulation

Table.1 Material properties for finite element analysis

Material	Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio [-]
SiO ₂	70	0.2
SiN	270	0.27

Residual stress[MPa]	
SiO ₂	-130
SiN	--

Fig.6 Anisotropy of crystal plasticity on interface adhesion strength

Fig.7 Interface crack extension behavior for the case of 0° and 90° between load and slip directions

4. 結果と考察

三次元弾塑性き裂進展シミュレーションにより評価されたすべり方向と荷重方向との角度が 0°, 90°の界面付着強度を図 6 に表示する. 0° と 90° の界面付着強度を比較すると 0° の方が約 25%小さくなった. 同じ Cu 結晶方位(110)でも, 界面付着強度がすべり方向と荷重方向との角度に依存することを見出した. その原因を検討するため, 同じ界面エネルギーの場合にそれぞれ Cu/SiN 界面き裂進展挙動および界面近傍の塑性域を調査した. 図 7 に示すようにすべり方向と荷重方向との角度 0°と 90°の界面き裂進展挙動が大きく異なっていることを見出した. また, 先行研究⁽⁶⁾と同じように結晶(110)面内一つすべり方向に対して荷重方向と 0°のとき, 試験片が界面上にすべりを発生しやすく, 界面近傍の塑性域が界面方向に広がり, 荷重方向と界面上のすべり方向の角度が 90°の場合に, 塑性域が界面方向に広がりにくいことがわかった. この結果により, Cu 単結晶の界面付着強度が界面のすべり易さに大きな影響を受けることが示唆された.

5. 結 言

結晶方位(110)の Cu の単結晶の基板上に, FIB を用いてすべり方向と荷重方向との角度 0°, 90°で試験片を作製し, 破壊試験と三次元弾塑性き裂進展シミュレーションを行うことで, 銅結晶塑性に起因する界面付着強度分布の異方性について検討した. 同じ Cu 結晶方位(110)でも界面き裂進展挙動が大きく異なっていることを見出した. Cu/SiN 界面付着強度が荷重方向とすべり方向との角度に依存し, 界面のすべり易さに大きな影響を受けることが示唆される. LSI 内部構造の機械的信頼性の向上には, 局所界面付着強度と配線表面の結晶の塑性異方性との相関性を, 局所的な塑性挙動を含めてより詳細に調査する必要があると認識した.

文 献

- (1) Kamiya, S., Sato, H., Nishida, M., Chen, C., Shishido, N., Omiya, M., Suzuki, T., Nakamura, T., Nokuo, T., Nagasawa, T. "Micro-Scale Evaluation of Interface Strength on the Patterned Structures in LSI Interconnects", *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1300, (2010), pp. 33-38.
- (2) Shishido, N., Oura, Y., Sato, H., Kamiya, S., Koiwa, K., Omiya, M., Nishida, M., Suzuki, T., Nakamura, T., Nokuo, T., Suzuki, T. "Crystal-orientation effect on local adhesion strength of the interface between a damascene copper line and the insulation layer", *Microelectronic Engineering*, Submitted.
- (3) Kamiya, S., Furuta, H., Omiya, M., Shimomura, H. "A novel evaluation method for interfacial adhesion strength in ductile dissimilar materials", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 75, (2008), pp.5007-5017.
- (4) Y. Huang. "A User-material Subroutine Incorporating Single Crystal Plasticity in the ABAQUS Finite Element program", *Havbard University Report*, MECH178, (1991).
- (5) Koiwa, K., Omiya, M., Shishido, N., Kamiya, S., Sato, H., Nishida, M., Suzuki, T., Nakamura, T., Suzuki, T., Nokuo, T. "Development of Cu/insulation layer interface crack extension simulation with crystal plasticity", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 52, (2013), 04CB05, pp. 1-7.