半導体デバイス配線構造における局所付着強度分布の統計的評価の試み

陳傳彤^{*1}, 宋戸信之^{*2}, 松本悟^{*1}, 神谷庄司^{*2}, 佐藤尚^{*2}, 西田政弘^{*2},

大宮正毅^{*3}, 鈴木貴志^{*4}, 中村友二^{*4}, 長澤忠広^{*5}, 野久尾毅^{*5}

A statistical study for distribution of local adhesion strength in semiconductor device metallization systems

Chuantong CHEN, Nobuyuki SHISHIDO, Satoru MATSUMOTO, Shoji KAMIYA,
Hisashi SATO, Masahiro NISHIDA, Masaki OMIYA, Takashi SUZUKI, Tomoji NAKAMURA,
Tadahiro NAGASAWA, Takeshi NOKUO.

^{*1} Department of Mechanical Engineering, Nagoya Institute of Technology,
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466-8555, Japan

A technique to evaluate local interface strength measured a considerable range of scatter in toughness of interface between Cu and SiN cap layer in LSI interconnect. In order to estimate the range of uncertainty in the evaluation procedure, the same technique was applied to the interface of vapor-deposited Au and native SiO₂ on a silicon wafer, which was expected to have a relatively homogeneous adhesion strength. By combining the obtained results with the statistical analysis, uncertainties in the evaluation procedure were evaluated and excluded from the scatter in the measurement results of Cu/SiN interface. Finally, the intrinsic fluctuation of interface strength due to the material properties was successfully determined.

Key words: Cu metallization systems, Interface adhesion, Local strength, statistical analysis

1. 緒言

半導体デバイスの小型化・高機能化に伴い、内部の配線は極めて複雑な三次元積層構造になっている。なかでも Cu 薄膜配線とその保護膜であるキャップ層からなる界面の付着強度は弱く、デバイスの信頼性確保にはこの定量的な評価が重要となる。また、微細な構造に起因する加工の不均一性などにより強度が配線上で異なる可能性も無視できず、デバイスの機械的な破壊を回避する設計を目指す場合、配線構造中の局所的な強度評価も求められる。神谷らは先に局所的な界面付着強度評価法⁽¹⁾を提案したが、これを付着強度が分布する系に適用した場合、計測誤差に起因するばらつきと強度そのもののばらつきとの分離が困難である。このため、従前の配線上局所強度評価事例⁽²⁾では、真の強度分布を定量的に評価するには至っていない。

そこで本研究では、比較的均一な界面付着強度が期待される試料を用いて局所強度評価法の確度を定量評価し、配線構造における界面付着強度評価の確度を推定することで、構造内部の物理的強度分布の有無を定量的に検討した。具体的には、配線構造体に比して均質な界面

(Au/SiO₂)を有する試料を作製し、局所付着強度評価を行って得られた結果をもとに、統計的な解析により評価手法の確度を定量化した。次にこれを基準に Cu/SiN 界面の評価結果に対して評価手法の確度を推定し、物理的な局所界面付着強度のばらつきを定量的に検討した。

2. 試験片の作製および離試験

試験片の作製手順を図1に示す。大気中での自然酸化により表面に厚さ数 nm の SiO₂ 層が形成された Si 基板の上に、真空蒸着によって金を厚さ 90nm 成膜した。次に、加工による薄膜への損傷が軽微な電子ビーム(EB)によって、金層の上に10μm 角で厚さ 0.3μm のアモルファス状の炭素を堆積させた。さらにその上に集束イオンビーム(FIB)を用いて同様に厚さ 2.4μm の炭素を堆積させた。試験片となる10μm 角柱直下の Au/SiO₂ 界面のみがはく離するように、最後に角柱周辺の金薄膜を FIB で削った。

Fig.1 Fabrication process of specimen by EB and FIB

^{*1}非会員, 名古屋工業大学.(〒466-8555, 名古屋市昭和区)

^{*2}正員, 名古屋工業大学, JST CREST.

^{*3}正員, 慶應義塾大学, JST CREST.

^{*4}非会員, 富士通研究所.

^{*5}非会員, 日本電子株式会社, JST CREST.

E-mail: ciq16616@stn.nitech.ac.jp

Fig.2 Experimental setup (a) and the schematic diagram of fracture test (b)

Fig.3 10 μm-square specimen before (a) and after fracture test (b)

作製した試料を用いて図 2(a)に示す実験装置ではく離試験を行った。試験片を試験装置のステージに固定して、試験片の側面から先端曲率半径 0.2μm の円錐状のダイヤモンド触針で直接荷重を加えた。図 2(b) は、試料ステージと針の相対的な動きにより試験片が剥離する様子を示している。このときの荷重は触針を保持する片持ちばりに貼り付けたひずみゲージで計測した。試験片のはく離前後の様子を図 3 に示す。

3. き裂進展シミュレーション

界面のじん性値を評価するために、有限要素法(FEM)を用いて薄膜界面における三次元き裂進展シミュレーションを行った。まずき裂前縁に一定のじん性値を仮定して、最も低い荷重でエネルギー解放率がじん性値に達する節点を解放する。節点解放を繰り返すことでき裂進展を再現し、実験により得られた最大荷重とき裂進展シミュレーションの最大荷重とを対応させることで、目的とする界面におけるじん性値を決定した。解析で用いた有限要素モデルを図 4 に、界面じん性値とき裂進展時の最大荷重との関係を図 5 に示す。また、解析に用いた材料定数を表1に示す。

Fig.4 FEM model of a specimen

Table 1 Material properties

Material	Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio [-]	Residual stress [MPa]
Silicon	166	0.22	0
Gold	106	0.3	0
Carbon	119	0.1	-130

4. 評価結果および考察

4.1 Au/SiO₂ 界面強度評価の統計的検討 電子線後方散乱回折法を用いて金薄膜試料を観察したところ、金の結晶粒径は試験片の大きさに対して十分小さく、本評価法によって得られるこの界面の付着強度は一定であると見なせると考えられる。このような Au/SiO₂ 界面を有する 12 個の試験片より得られたじん性値を図 6(a)に示す。図 5 に示すように、計測荷重とじん性値との関係は実計測荷重範囲では線形とみなせるため、次式を用いて各計測荷重 f_m に対応するじん性値を得た。

$$G = af_m + b \quad (1)$$

ほぼ均質の Au/SiO₂ 界面の付着強度が標準偏差 σ (G_{Au}) = 0.17J/m² とばらつく。これが本評価法の誤差に起因すると考え、以下のような統計的解析により評価手法の精度を定量評価した。前述のように、本研究での付着強度評価法は実験による試験片剥離荷重の計測と、シミュレーションによる界面じん性値の決定とで構成され、計測荷重とじん性値の線形性も考慮すると、これら2つの要素を含む次式を定義することで得られたじん性値が表現できる。

$$G = a(f_0 + \Delta f_n + \Delta f_s) + b \quad (2)$$

ここで f_0 は Au/SiO₂ の理想的な強度に対応する荷重であり、 Δf_n は測定機器による荷重計測の誤差である。また、 Δf_s は有限要素モデルの単純化に起因するものである。実際は試験片の個体差や針の接触条件などではく離に要する荷重が変動するが、完全に解析モデルに反映することは現状では不可能であり、得られるじん性値はこれらを単純化した影響でばらつく。このような強度により変動する荷重と前述の測定機器による荷重計測の誤差を内包するのが、本評価法で得られた計測荷重であり、界面じん性値である。

測定機器による計測荷重の誤差 Δf_n は再現実験によって推定した。すなわち、実際のはく離荷重と同程度の重さ 6.81mN の錘をダイヤモンド触針にぶら下げ荷重計測を再現することで、はく離荷重の計測誤差の特性を推定した。

解析に起因する誤差 Δf_s は統計的に推定した。実試験と完全に整合する解析モデルを構築できた場合、個々の

Fig.5 Correlation between the maximum load and the interface strength of interface Au/SiO₂ obtained by finite element analysis

Fig.6 Evaluated strength of interface between Au and SiO₂ (a), and between Cu and SiN (b)

試験に対応する荷重-じん性値曲線が描かれ、Au/SiO₂ 界面の一定の付着強度に対応する個々の荷重は $f_0 + \Delta f_s$ となる。しかし実際には平均的形状を有する解析モデルを作成してこれらの荷重に適用するため、得られるじん性値がばらつく。このとき、解析条件と相関のある Δf_s と機器による Δf_n は明らかに独立な事象であるため、式(2)の両辺に対して分散を計算すると次式のように記述でき、 Δf_s の分散 $\sigma^2(\Delta f_s)$ を推定できる。

$$\sigma^2(\Delta f_s) = \frac{\sigma^2(G)}{a^2} - \sigma^2(\Delta f_n) \quad (3)$$

Au/SiO₂ 界面が不均質で無視できないじん性値のばらつきを有していた場合、 Δf_s はこの影響をも内包している量であり、式(3)は実際の手法の誤差を過大に評価している可能性がある。一方で、観察によって計測可能な試験片寸法および針の接触位置を解析モデルに反映させた場合、それによる荷重変動 Δf_{s0} は Δf_s より小さいものの有限値であり、これがシミュレーション起因の誤差で考えられる最小の値である。したがって、このときの評価手法の誤差は $0.04\text{J/m}^2 < \sigma(G_{\text{error}}) < 0.15\text{J/m}^2$ であると推定される。各誤差要素のじん性値への影響を図7に示す。

Fig.7 The standard deviation of Au/SiO₂ interface strength induced by different type of fluctuations

4.2 Cu/SiN 界面付着強度の分布の推定

図8に示す荷重-じん性値曲線の一次近似式(4)に従い、Cu/SiN 界面の付着強度を得た。

$$G = AF_m + B \quad (4)$$

ここで、 F_m は計測した Cu/SiN 界面のはく離荷重である。各試験片の値を図6(b)に示す。得られたじん性値の分布は $G=11.75 \pm 1.54\text{J/m}^2$ であった。

Cu/SiN 界面においては物理的に界面じん性値がばらつく可能性を考慮して、前述の評価法の誤差因子とともに新たに式(5)のように定義する。

$$G = A(F + \Delta F_n + \Delta F_s) + B \quad (5)$$

ここで、 F は分布する Cu/Si 界面強度に対応したはく離荷重である。計測荷重の精度 ΔF_n ははく離荷重の平均値 22.39mN に相当する錘を用いて同様の再現実験により評価した。シミュレーションの不整合によるばらつきは、前節の場合と同様に個々の条件を計測可能な範囲で反映させると、シミュレーション起因の誤差で考えられる最小の値 ΔF_{s0} が得られる。一方で、Au/SiO₂ 試料と Cu/SiN 試料の試験片加工およびはく離試験は同じ装置環境で行ったことから、内在する誤差要因やそれらの発現量は同じ傾向である

と考えられる。誤差の発現量の比率がそれぞれのケースで全く同じであれば、それらに起因する誤差は次式を満たすことが予想される。

$$\frac{\sigma(\Delta f_{s0})}{\sigma(\Delta f_s)} = \frac{\sigma(\Delta F_{s0})}{\sigma(\Delta F_s)} \quad (6)$$

式(6)で得られた ΔF_s は過大評価した Δf_s を基準とする、最も手法の精度を低く想定した値である。シミュレーション起因の誤差 ΔF_s 、荷重の計測誤差 ΔF_n 、Cu/SiN の界面じん性値に応じて分布する F は明らかにいずれも互いに独立な事象であり、式(5)の両辺の分散を計算すると、 F の分散が推定できる。したがって、Cu/SiN 界面の付着強度は本質的にばらつき、その標準偏差は $0.65\text{J/m}^2 < \sigma(G_{\text{Cu}}) < 1.47\text{J/m}^2$ の範囲に存在すると推定された。このとき計測手法の誤差は $0.39\text{J/m}^2 < \sigma(G_{\text{error}}) < 1.38\text{J/m}^2$ であった。各誤差要素のじん性値への影響を図9に示す。

Fig.8 Correlation between the maximum load and the interface strength of Cu/SiN obtained by finite element analysis

Fig.9 The standard deviation of Cu/SiN interface strength induced by different type of fluctuations

5. 結言

局所付着強度評価法を Au/SiO₂ 界面を有する試料に適用し、その評価手法ばらつきを定量的に推定した。この結果を踏まえて、Cu/SiN 界面の付着強度評価に対して評価手法のばらつきを推定し、界面強度の本質的な分布の存在について検討した。半導体デバイス配線構造における Cu/SiN 界面の付着強度は $G=11.75\text{J/m}^2$ であり、その標準偏差が $0.65\text{J/m}^2 < \sigma(G_{\text{Cu}}) < 1.47\text{J/m}^2$ の範囲に存在することを明らかにした。

参考文献

- (1)S. Kamiya, H. Simomura, M. Omiya, T. Suzuki, Journal of Materials Research 25, No.10, (2010), pp. 1917-1928.
- (2)Shoji Kamiya, Hisashi Sato, Masahiro Nishida, Chuantong Chen, Nobuyuki Shishido, Masaki Omiya, Takashi Suzuki, Tomoji Nakamura, Takeshi Nokuo, Tadahiro Nagasawa, AIP Conference Proceedings 1300 (2010), pp.33-38.