

SEM 式ナノプロービングシステムの開発と半導体デバイス解析への応用

Development of SEM based Nano-Probing System and Its Application

三 井 泰 裕

Yasuhiro Mitsui

^a (株)日立ハイテクノロジーズ

要 旨 近年のLSI故障解析ではデバイスの微細化、構造の複雑化に伴い、詳細な故障箇所同定が困難となっている。これに対応するための技術として走査電子顕微鏡 (SEM) を用いたナノプロービングシステムが開発された。SEM 式ナノプロービングシステムでは SEM で観察しながら、トランジスタや配線に微細探針を接触させ、電気特性を計測する。本稿では SEM 式ナノプロービングシステムの実用化に対する開発課題 (微細箇所へのプロービング可能な探針形状、高精度、高信頼測定のためのプローブ-試料間接触抵抗低減、探針長寿命化、高スループット化の為に高精度迅速プローブ動作制御、迅速プローブ交換、使いやすさのための SEM の高画質化、広視野化など) および実際の解析事例について概説する。

キーワード：ナノプロービングシステム、SEM、故障解析、LSI

1. まえがき

半導体製造分野では新デバイス・プロセスの立上げ期間短縮や量産での高歩留り維持のために、故障 (不良) の原因を究明してプロセスの改善指針を明確にする故障解析は極めて重要な役割を果たしている。しかし、複雑、微細化された LSI での故障解析は単純ではない。故障解析を難しくしている原因のひとつに複雑な回路の中の詳細な故障位置の特定がある。図 1 に LSI の故障解析フローを示す。実際の故障は複雑な回路の中で単一トランジスタ、単一配線さらにはゲート、ソース、ドレイン、コンタクト、ビアのように LSI の最小構成要素で起こっており、そのような最小構成要素にまで

故障箇所が絞込めないと、最終的な故障原因の解明を行なう透過電子顕微鏡 (TEM) や走査電子顕微鏡 (SEM) などを用いた物理解析まで辿り着くことができない。そこで、故障原因をこの最小構成要素まで絞込む技術の実現が以前より望まれていた。

この詳細故障箇所絞込みを行う技術としてナノプロービングシステムが開発された^{1~5)}。ナノプロービングシステムでは実際回路内の単一トランジスタや単一配線を電氣的に測定し、その特性変化から詳細な故障箇所の推定を行う。現在、ナノプロービングシステムには SEM と原子間力顕微鏡 (AFM) を利用した方式があるが、本稿ではプロービング操作が簡便で、高測定スループットが可能な SEM 式について述べる。

2. ナノプロービングシステム概要

SEM 式ナノプロービングシステムの装置概要を図 2 に示す。ナノプロービングシステムは光学式プロービングシステム

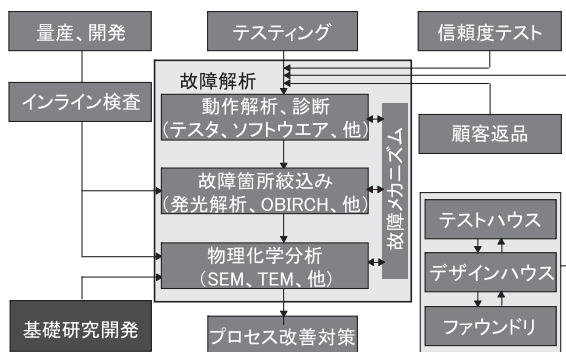


図 1 LSI の故障解析フロー

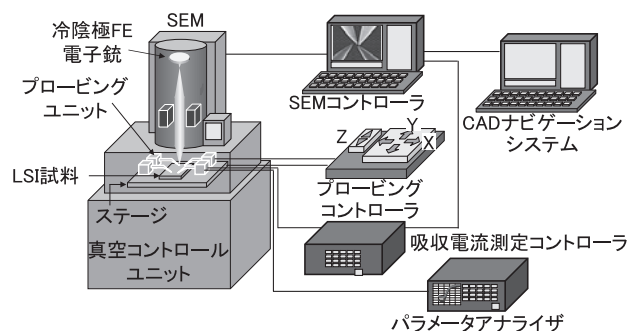


図 2 SEM 式ナノプロービングシステム概要

^a 〒 312-8504 茨城県ひたちなか市市毛 882
TEL: 029-354-5497; FAX: 029-275-5119
E-mail: mitsui-yasuhiro@naka.hitachi-hitec.com
2009年5月22日受付

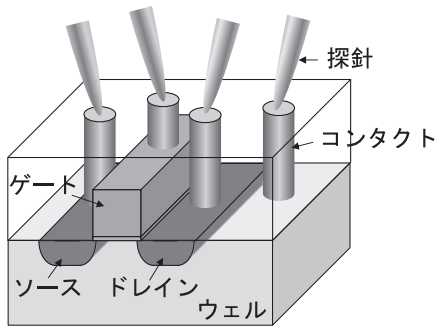


図3 トランジスタへのプロービング

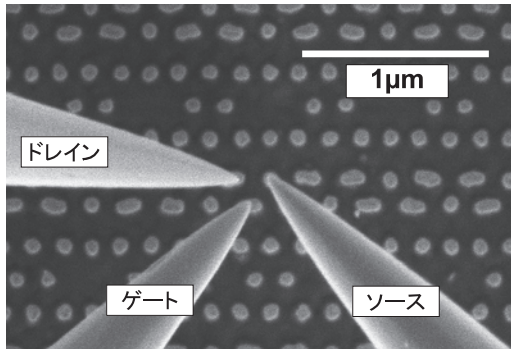


図4 実デバイスへのプロービング (デバイス: 45 nm SRAM)

ムと同様の機能を持つが、測定対象が実回路であるため、基本的には観察のためのSEMとSEM内に設置される極めて微細なプロービングユニットで構成される。プローブユニット先端はnmデバイスのトランジスタや配線に直接接触可能な、先端半径数十nmの微細探針となっている。トランジスタ測定の場合は、この微細探針がゲート、ソース、ドレイン、ウェルの各コンタクトに接触される(図3)。測定に必要な電圧はパラメータアナライザから各探針に供給され、各探針で測定された電流がパラメータアナライザに記録される。

SEM式ナノプロービングシステムの量産適用には微細箇所へのプロービング可能な探針形状、高精度、高信頼測定のためのプローブ-試料間接触抵抗低減、探針長寿命化、高スループット化の為の高精度迅速プローブ動作制御、迅速プローブ交換、使いやすさのためのSEMの高画質化、広視野化などの開発が必要であった。

3. SEM式ナノプロービングシステムの課題と対応策

3.1 探針形状と駆動制御

ナノプロービングシステムでは微細トランジスタや配線に接触させるための探針が必要である。図4に45nmノードSRAMのpMOS(MOS(Metal Oxide Semiconductor)のうち正孔が電流を運ぶタイプ(p-channel MOS))コンタクトに接触させた探針を示す。探針は隣り合う探針同士での接触を避けるためには細いことが望ましいが、後述する低接触抵抗化や長寿命化のためには太いことが望ましい。この課題に対し、材質はタングステン、形状は図4のような、先端の尖った、

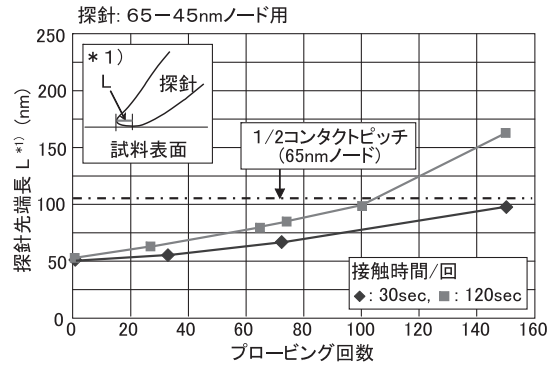


図5 繰り返しプロービングによる探針寿命評価

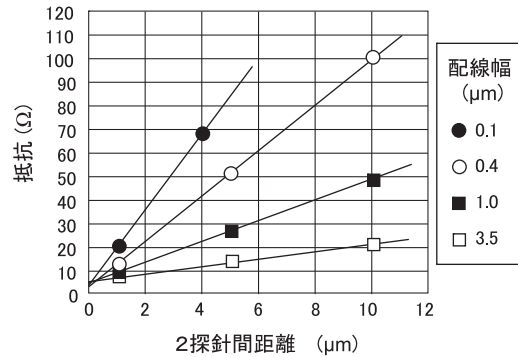


図6 2探針によるタングステン配線抵抗測定

釣鐘形が適していることが実験から確認された。本図ではプロービングを行うのに十分なスペースが探針間にあることがわかる。実際の探針はこの釣鐘形状が基本で、先端サイズが各デバイス世代に適合されたものとなっている(先端半径がおよそ1/4コンタクトピッチ)。

探針の駆動制御はピエゾ素子で行われ、駆動最小ピッチは5nmとコンタクト径に対して十分小さいので、高精度のプロービング(幾何的配置)が可能である。

3.2 探針寿命

ナノプロービングシステムの探針は極めて微細のため、何回かのプロービングで先端の塑性変形や磨耗で使用できなくなる。しかし、故障解析やプロセス評価では多量の試料を測定する必要があるので、長寿命化による探針の消費量低減は実用上の重要課題である。

この長寿命化に対し、前記の探針の釣鐘形状が有効であった。図5に65-45nmノード用探針の先端塑性変形による寿命評価結果を示す。65-45nmノード用探針はおよそ100回程度のプロービングが可能である。この回数は1日の測定数として十分と考えられる。

3.3 探針-試料間接触抵抗

高精度、高信頼度の電気特性を得るためにはプローブと試料間の接触抵抗低減は必須である。接触抵抗低減に対し、釣鐘形状プローブによる、コンタクトへの適度な加圧、試料表面の清浄化が検討された。結果は図6に示されるが、タングステン配線に対する接触抵抗は数オームに低減された。こ

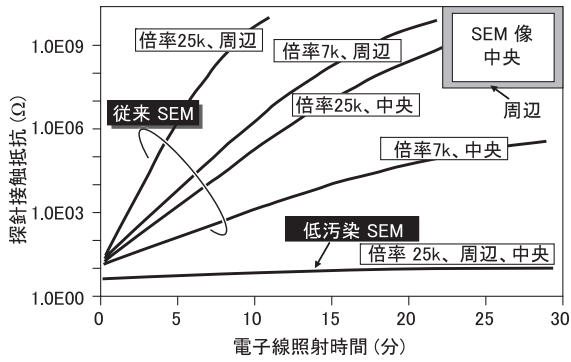


図7 電子線照射による探針接触抵抗変化

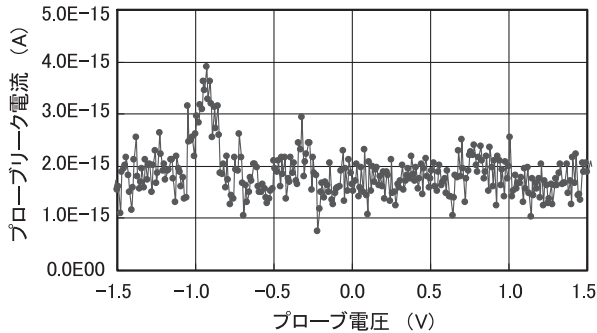


図8 プローブリーク電流評価

れは静的電気特性評価に対しては十分低い値である。

また実用上の接触抵抗低減にはSEM電子ビーム照射による試料表面汚染低減も重要な課題であった。この試料表面汚染低減に対しては、通常のSEMよりも高真空度 (10^{-5} Pa) の試料チャンバ、低脱ガス材質の配線および低汚染真空システムの使用で対応した。この結果、プロービングに必要な時間の電子線照射では、表面汚染によるプローブ-試料間接触抵抗が殆ど増加しないシステムが達成されている (図7)。

3.4 電流検出限界

低消費電力デバイス等でのリーク電流評価ではできるだけ低い電流を測定したいという要求がある。電流検出下限を制限しているのはノイズ、リーク、ドリフトである。真空内測定は大気中測定に比べ、比較的ノイズやドリフト低減には有利である。本開発ではさらに配線のシールド強化や物理的振動抑制によりノイズを低減させ、また、リーク低減に対してトライアキシャル配線方式を検討した結果、プローブリークおよびノイズは fA レベルに低減された (図8)。

3.5 信頼性

プロービングシステムで最も重要なのが、データの信頼性である。故障箇所データを採取したとき、それが信用できるのか信用できないのかによって、そのシステムの性能が決まる。したがって安定した試料、安定したトランジスタにおいて、プロービングを繰り返したときのデータ再現性が重要となる。

図9に45 nm SRAM nMOS (電子が電流を運ぶタイプのMOS (n-channel MOS)) での同一トランジスタにプロービ

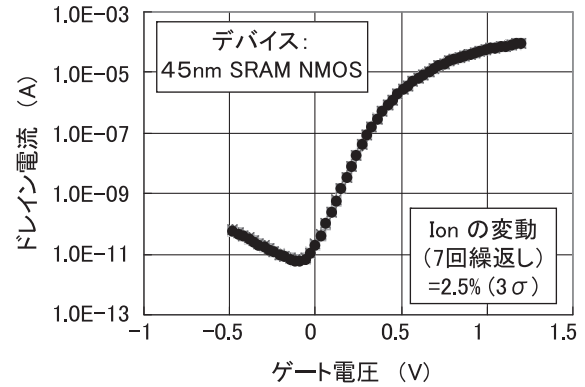


図9 プロービング繰返し時の再現性

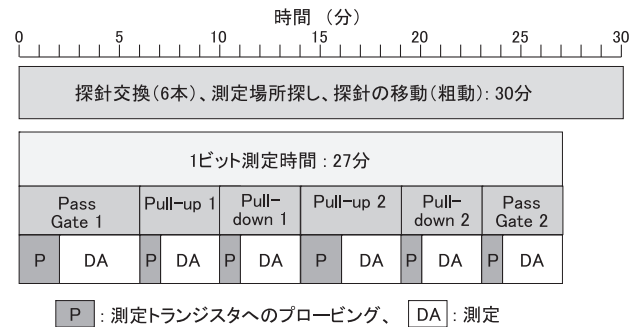


図10 測定スループット (45 nm SRAM)

ングを繰り返したときの再現性を示す。7回の繰返しに対し、変動は3σで3%以内であり、極微小領域でのプロービングであることを考えると、極めて良好な結果であったと考えられる。この高信頼性には上記探針-試料間接触抵抗の低減、電流測定における低ノイズ、低リーク化が不可欠であった。

3.6 スループット

故障解析ではスループット向上も重要な課題である。スループット向上に対し、真空内探針、試料交換機構、複数二次電子検出器による高画質SEM像、ピエゾ素子による高速高精度プロービング制御機構 (高速ステップ移動と5 nm高精度位置制御)、繰返しパターンの認識 (セルカウント技術) が検討された。さらに高スループット化とともに、使い勝手を向上させる上方向、横方向から探針位置を観察するCCDカメラ、SEM視野から外れた場所へのプロービングをステージ移動させずに行うための広領域イメージシフト (200 μm)、複雑な回路内で測定箇所を迅速に探し出すCADナビゲーションシステムが検討された。これらの開発により、45 nm SRAMにおいても図10に示すような高スループットが達成された。実際のSRAM1ビット (6MOS) のプロービング時間は10分以内である。

4. 解析事例

ナノプロービングシステムの解析事例としてSRAMのシングルビット故障解析を示す。通常SRAMではフェイルビッ

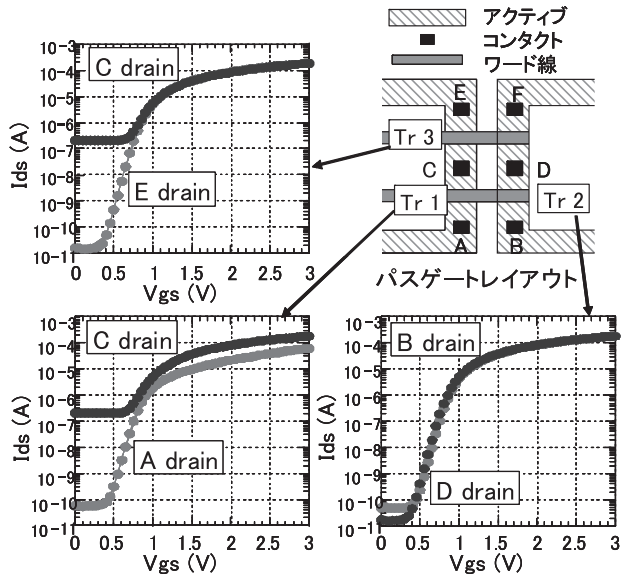


図 11 SRAM 故障ビットの Vgs-Ids 特性

ト解析により、故障ビットは特定される。しかし、SRAM は 6 個のトランジスタから構成されるため、6 個のうちのどれが異常であるのか、また特性的にどのように異常なのか特定されないと、TEM、SEM を用いた物理分析が行えない。そこでナノプロービングシステムを用いた故障トランジスタの特定が必要となる。

故障ビットの測定結果を図 11 に示す。この結果から、故障トランジスタは Tr1 と Tr3 であり、コンタクト C をドレインとした時のオフ電流リークが故障原因であることがわかる。このことから、プロセス故障原因としてはコンタクト C に関連する接合耐圧低下と予想される。

そこで、プロセス故障原因を究明するためにコンタクト C の断面が TEM 観察され (図 12 (a))、コンタクト底部端の TiN 膜の異常が認識された。さらに、この異常をより明確にするために、TEM-EELS (TEM-Electron Energy Loss Spectroscopy) による Ti 元素マップが取得された (図 12 (b))。この図ではバリアメタルの TiN の一部が欠落していることが明瞭に観察されている。すなわち、プロセス故障原因は TiN の成膜異常であり、タングステン成膜時に原料ガス (WF6) から解離したフッ素が、この TiN 欠落部を通して Si 基板に到達し、エンクローチメントを引き起こした結果、接合耐圧が低下したものと推察できる。この解析結果から、TiN 成膜プロセスが改善され、この故障は解決された。

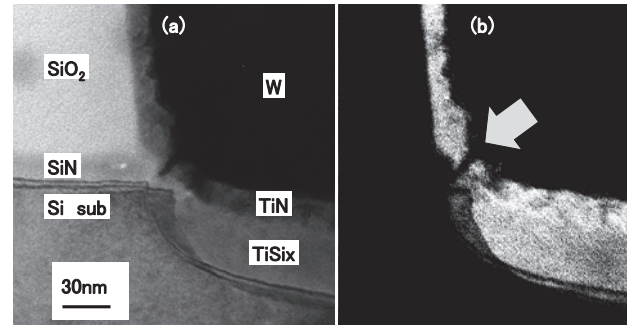


図 12 異常コンタクトの断面 TEM 像と Ti 元素マップ
(a) 断面 TEM 像, (b) TEM-EELS による Ti 元素マップ

5. おわりに

SEM 式ナノプロービングシステムの課題と対応策を概説した。本システムはすでに実際の LSI 故障解析、プロセス評価に多用されており、今後の LSI の微細化、構造の複雑化とともに本システムの必要度はさらに増大すると予想されている。そのために、高画質 SEM、不安定なデバイスに対する電子線ダメージ低減など、LSI 微細化対応技術の開発が鋭意行われている。また、配線故障解析のための吸収電流測定 (EBAC) 機能も付加され、多用途システムとしても発展している。

謝 辞

本開発に多大なご援助を頂いた (株) ルネサステクノロジ 水野貴之氏に深く感謝いたします。

文 献

- 1) Mitsui, Y., Yano, F., Kakibayashi, H., Shichi, H. and Aoyama, T.: *Microelectronics Reliability*, 41, 1171 (2001)
- 2) 柳田博史, 水野貴之, 矢野史子, 朝山匡一郎, 羽崎栄一, 揚村寿英, 三井泰裕, 山田 理: LIS テスティングシンポジウム会議録, 359-362 (2004)
- 3) 水野貴之, 柳田博史, 矢野史子, 朝山匡一郎: “ナノ・プローバを用いた不良解析” LIS テスティングシンポジウム会議録, 363-365 (2004)
- 4) 三井, 奈良, 澤島, 斉藤, 砂押, 羽崎, 高内, 矢野, 柳田, 水野, 山田, 古川, 渡辺: LIS テスティングシンポジウム 2005 会議録, 大阪, 2005 年 11 月, 335-340 (2005)
- 5) Wu, C.C., Lee, J.C., Chuang, J.H. and Li, T.T.: *Proc. 31st International Symposium for Testing and Failure Analysis*, San Jose, November 2005, 183-185 (2005)