超LSI故障個所解析装置の開発

研究ノート

中　前　幸　治*

Development of equipment for VLSI failure analysis

Key Words : LSI, failure analysis, Laser-SQUID microscopy, Laser-terahertz emission microscopy, defect localization

1．はじめに

科学技術振興機構（略称JST）先端計測分析技術・機器開発事業の一部として行われている、「超LSI故障個所解析装置」の開発に関する研究を紹介する。

情報システムの大規模化・複雑化がすすむにつれて、人の諸活動が情報システムに依存する度合いは増す一方であり、その信頼性、安心・安全性の確保はきわめて重要な社会的課題となっている。情報システムの基盤となるハードウェアのエンジンである超大規模集積回路（超LSI、VLSI）も、それ自身が膨大な数の回路素子を含む巨大システムであり、それを構成する半導体素子の製造はナノメータオーダーや原子オーダーという物理的微細化の限界に近づき、その信頼性、安心・安全性を保証することはこれまでになく困難になってきている。さらにハードウェアは必ず経年劣化を引き起こす物理的材料で構成されている。このような巨大システムにおける信頼性等を保証するためには、物理的限界に近い分解能で、不具合個所を特定し、原因究明することが必要である。

LSIの微細構造の計測・分析をナノメータオーダーで行なうための技術・手法・機器として、透過電子顕微鏡や走査プローブ顕微鏡をベースにしたものに代表される多くのものが提案・研究され、実用化されている。不具合個所が特定された場合には、LSIチップの特定個所を切り出し、これらの技術・手法・機器を利用して、原因究明が行われる。したがって、大きな問題は巨大なシステムから不具合個所を特定する技術・手法・機器が必要になることである。不具合個所の特定が、いかに困難なことかを、すこし考えてみる。例えば、一辺10.0　mm四方の正方形形状のVLSIチップがあったとし、その表面積が地球の表面積5.1×10^{14} m^2に相当すると考えると、1ナノメートル四方は地球表面の2.3メートル四方の大きさになる。さらに、先端VLSIチップは、10層以上の薄い層が積み重なって構成されている。したがって、VLSIの信頼性等を保証するためには、何層もの地球表面層の規模から数メートル四方の大きさの不具合個所を特定することが要求されることとなる。

通常、不具合個所を特定、或いは絞り込むために、まず、VLSI設計データを利用して、電源を印加し、入力信号に対する出力応答を観測することにより疑わしい不具合領域の候補を抽出する。次に、チップ内部を直接観測可能な装置、例えば、エミッション顕微鏡や電子ビームテスター等、を用いて不具合領域のさらなる絞り込みを行うが、被疑領域・個所をミクロンオーダー以下まで絞り込む技術は非常に限定されており、その適用には多くの限界がある。

このような困難な状況を解決するため、「超LSI故障個所解析装置」の開発が開始された。この解析装置の最大の特徴は、VLSIに電源を印加すること、および外部信号を入力することを必要としないことである。レーザビームをVLSIチップ内在のpn接合部に照射したときに発生する電流を信号の源とする手法・技術・装置である。これにより、VLSIの内部を局所的に探索しながら不良個所を特定することが期待される。以下に「超LSI故障個所解析装置」の開発状況を紹介する。

*Koji NAKAMAE
1954年3月生
大阪大学大学院工学研究科電子工学専攻
後期課程修了（1982年）
現在、大阪大学大学院　情報科学研究科
情報システム工学専攻　教授　工学博士
集積システム診断学
TEL：06-6879-7810
FAX：06-6876-4599
E-mail：nakamae@ist.osaka-u.ac.jp

２．開発装置の概要

開発中の故障個所解析装置は、主に、走査レーザSQUID顕微鏡機能、レーザテラヘルツエミッション顕微鏡機能、および、故障個所絞込み支援ソフトウェアとから構成されている。

（1）走査レーザSQUID顕微鏡

走査レーザSQUID顕微鏡（以下、L-SQ）は、レーザと超伝導量子干渉素子（Superconducting Quantum Interference Device：SQUID）を用いた磁束計を組み合わせた顕微鏡である。図１に示すように、レーザビームをLSIチップの裏面から照射し、表面付近のp-n接合近傍に電流を発生させる。この電流がp-n接合に接続する導体部を流れる。この電流により励起される微弱な磁場をSQUID磁束計で検出する。

具体的には、変調をかけたレーザビームをLSIチップ裏面側から走査させ、生じた磁場を表側にあるSQUID磁束計で検出し、ロックイン検波することで微弱磁場の強度像と位相像を得る。この場合の空間分解能は、主に、レーザビームの径で決まり、サブミクロンの分解能が期待出来る。一方、SQUID磁束計は10^{-12} Tという超高感度で磁場を検出できる。また、LSIチップの裏面側からレーザを照射し、表面側に磁束計を配置することで、光電流により発生した磁場を効率よく高感度で検出できる。すなわち、LSIチップの配線の多層化がいかに進もうともその厚さは1層あたり１μm前後であり、15層に達したとしても配線部全体の厚みは10 μm程度である。従って、LSIチップの表面側にSQUID磁束計を配置することで、Si基板表面直下のp-n接合付近や多層配線のどの層で発生する磁場も大きな減衰無く検出可能と期待できる。

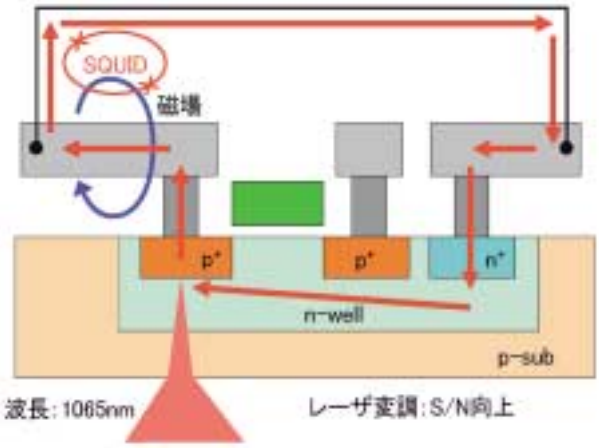

図１　走査レーザSQUID顕微鏡法の原理図

（2）レーザテラヘルツエミッション顕微鏡

レーザテラヘルツエミッション顕微鏡（以下、LTEM）では、フェムト秒レーザとテラヘルツ（THz）電磁波検出器を組み合わせる。図２に示すようにフェムト秒レーザビームをLSIチップ裏面から照射し、表面付近のp-n接合で急激に発生する光電流により励起されるTHz電磁波を検出する。

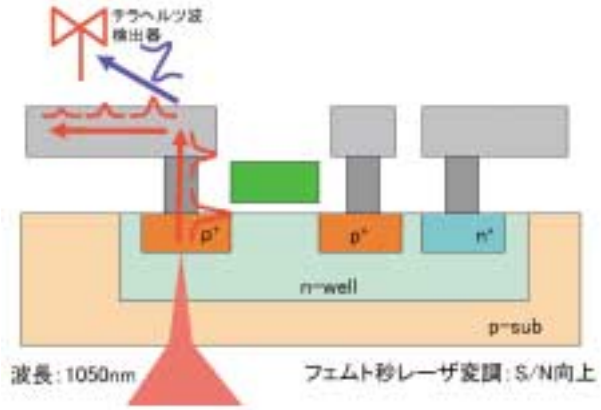

図２　レーザテラヘルツエミッション顕微鏡法の原理図

（3）故障個所絞込み支援ソフトウェア

開発しつつある装置では、上記ふたつの顕微鏡機能を核として、VLSI設計データを利用するソフトウェアを支援ツールとして用いている。従来の故障個所絞込み支援ソフトウェアは、全て、LSIの入力端子からの信号入力があることを前提に構築されたものであるため、利用できない。開発しつつあるソフトウェアは、LSI設計データを元にL-SQ像[1]およびLTEM像[2]をシミュレートするもの、想定される不具合がその観測画像に及ぼす影響をシミュレートするもの、シミュレートされた像を観測画像と比較し不具合を抽出するものである。

（4）開発中の装置外観

写真１に開発中の装置の外観を示す。中央上側に配置されているのが、SQUID磁束計である。

３．適用例[3],[4]

紙面の都合上、現在までに得られた成果の内の１例を紹介する。走査レーザSQUID顕微鏡法を用いた適用例である。

あるひとつの256Mbit DRAM（Dynamic Random

写真１　開発中の装置の外観

Access Memory）チップに電気的試験を施した結果、スタンバイ電流不良という不具合が検出された。この原因個所を特定するために、走査レーザSQUID顕微鏡法をこのチップと正常チップに適用した。手法は２段階からなる。

第１段階では、SQUIDとレーザビームの配置を固定したまま、LSIチップを走査させた。LSIチップから見れば、レーザビームを走査させたことになる。この走査方法による正常・不良観測画像の比較により、正常チップと異なる電流経路に流れる電流源の位置に関係した情報が得られる。図３に得られた像（L-SQUID像：強度像（左）と位相像（右））を示す。比較のために、正常チップから得られた像（上側）も示した。差異が抽出された個所の代表的なところを強度像上に１と２で示した。例えば、２は、正常と不良チップ間でコントラストが大きく異なっているところから任意に抽出した個所を示している。

第２段階では、２の個所にレーザビームの照射点を固定し、SQUID検出器を走査した。この走査方法により、固定照射点に発生した誘起電流の流れる経路に関係した情報が得られる。得られた像（S-SQUID像）を図４に示す。図には、得られた磁場情報から電流に変換した電流像をも示した。さらに、

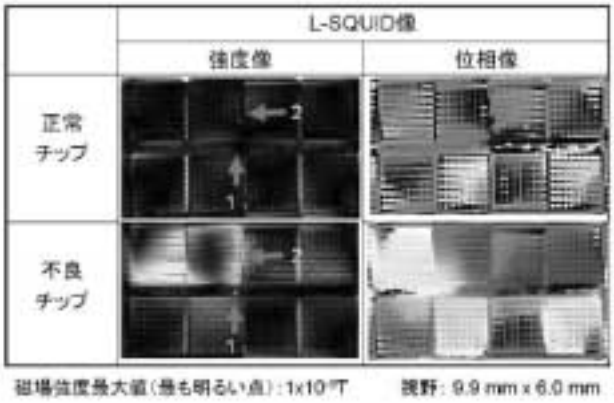

図３　第１段階で得られたL-SQUID像

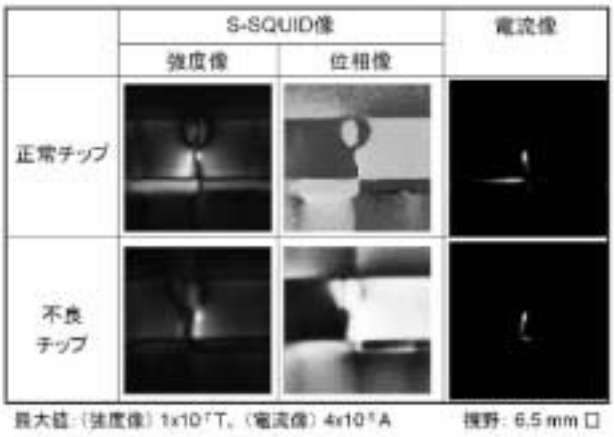

図４　第２段階で得られたS-SQUID像：
レーザビームを２に固定照射

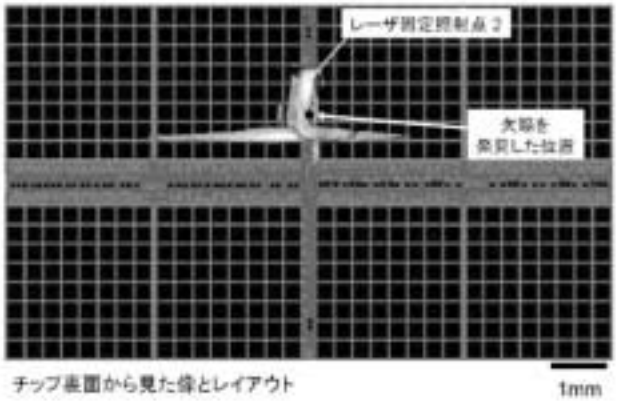

図５　LSIチップレイアウト図に重ねた電流像

この電流像をLSIチップのレイアウト図と重ね合わせた結果を図５に示す。これから欠陥個所を特定出来た。確認のために、不良チップのこの個所を光学顕微鏡で観測した結果を図６に示す。上側に低倍率画像を、下側に高倍率画像を示す。不良チップには、数十μmの大きさの欠陥があることが確認された。

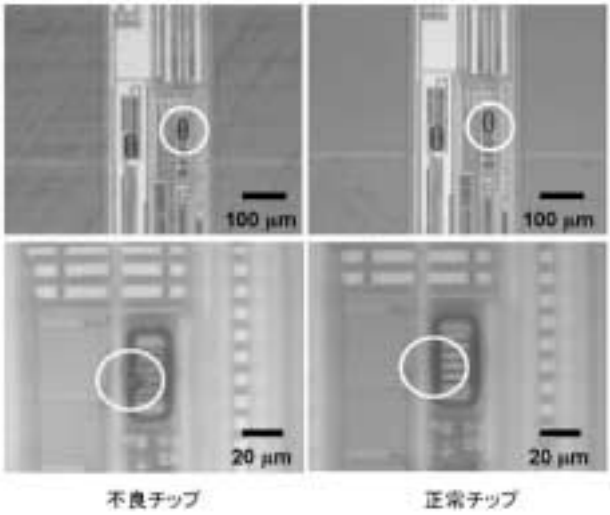

図６　欠陥の確認のための光学顕微鏡像：
上段　低倍率、下段　高倍率

４．おわりに

情報システムの信頼性、安心・安全性の確保はきわめて重要な社会的課題となっている。ここで紹介した「超LSI故障個所解析装置」の開発が信頼性、安心・安全な社会システムの構築の一助となることを願い、まだまだ課題の多い研究開発に日夜励んでいる。皆様方のご理解・ご支援をお願いする次第である。

なお、本「超LSI故障個所解析装置」の開発に、NECエレクトロニクス（株）二川　清氏をチームリーダーとして、理化学研究所、松下電器産業、浜松ホトニクス（株）、大阪大学（３研究室）が参画している。

参考文献

１）山下広展，三浦克介，中前幸治，井上彰二，二川清，"LSI故障診断用走査レーザSQUID顕微鏡観測画像の電流密度分布シミュレーション"，第28回LSIテスティングシンポジウム会議録，pp. 327-332 (12-14 November 2008).

２）御堂義博，中前幸治，山下将嗣，斗内政吉，二川清，"LTEMによるLSI故障解析のためのTHz波シミュレーション", 第69回応用物理学会学術講演会(Sep. 2008)

３）二川清，井上彰二，永石竜起，松本徹，三浦克介，　中前幸治，"走査レーザSQUID顕微鏡のLSI故障解析への新しい適用法"，第28回LSIテスティングシンポジウム会議録，pp.321-326 (12-14 November 2008).

４）K. Nikawa, S. Inoue, T. Nagaishi, T. Matsumoto, K. Miura and K. Nakamae, ”New approach of laser-SQUID microscopy to LSI failure analysis,” IEICE Trans. Electron., E85-C, to be published, March 2009.