

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 8 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560353

研究課題名（和文）

高速・高精度な超 LSI 故障個所解析装置用診断支援手法の開発

研究課題名（英文）

Development of a fast and accurate VLSI diagnostic method with a VLSI fault localization system

研究代表者

三浦 克介 (MIURA KATSUYOSHI)

大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号：30263221

研究成果の概要（和文）：走査レーザ SQUID 顕微鏡法（L-SQ 法）画像およびレーザテラヘルツ波顕微鏡法（LTEM 法）画像を生成するシミュレータを高速化し、これらを用いた超 LSI 故障個所診断支援法の開発を行った。L-SQ 像シミュレータは 100 倍以上、LTEM 像シミュレータは約 10 倍の高速化を達成した。シミュレータを利用した L-SQ 法による故障診断支援手法では故障位置を第 1 位の順位で指摘し、LTEM 法による故障診断支援手法では回路全体の 8% の領域まで故障を絞り込むことができた。

研究成果の概要（英文）： We speeded up the scanning laser SQUID microscope (L-SQ) image simulator and the laser terahertz emission microscope (LTEM) image simulator and developed VLSI diagnostic methods utilizing these simulators. The L-SQ image simulator became more the 100 times faster and the LTEM image simulator became about 10 times faster. The developed diagnostic method based on the L-SQ image simulator successfully localized a fault at the first rank. The LTEM image simulator based diagnostic method localized a fault into 8 % area from the whole circuit.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010 年度	600,000	180,000	780,000
2011 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：電気電子工学

科研費の分科・細目：電子デバイス・電子機器

キーワード：大規模集積回路，故障診断，故障解析，シミュレーション，走査レーザ SQUID 顕微鏡法，L-SQ 法，レーザテラヘルツ波顕微鏡法，LTEM 法

1. 研究開始当初の背景

LSI 製造技術の微細化により，SoC（システム・オン・チップ）あるいは SiP（システム・イン・パッケージ）が実現されるに至っている。このような最先端 LSI チップの構造

の微細化・複雑化の進展に伴って，故障に対する耐性が弱まり，故障をいかに克服するかが，最重要課題のひとつとなっている。

LSI の信頼性を高める為に，故障した LSI を診断・解析し，その故障原因を特定して，

設計工程あるいは製造工程へとフィードバックする取り組みが日々行われている。設計工程・製造工程へのフィードバックを速やかに行い、信頼性向上のスピードを加速する為には、LSI の診断・解析を効率化することが欠かせない。LSI の故障診断の困難性を高めている一つの要因として、外部接続ピン数の増加がある。近年では、1000 ピンを超える外部接続ピンを有する LSI も珍しく無い。しかも、故障診断装置でこのような LSI を診断する為には、特殊なソケットや専用の DUT (device under test) ボードを必要とし、故障診断のコストを引き上げている。

このような問題に対し、チップ外部との電氣的接続を必要としない、超 LSI 故障個所解析装置が開発されている。この装置では、チップ裏面から近赤外レーザを照射し、p-n 接合で発生する微弱な光電流による磁場を超高感度の磁場センサーである SQUID (superconducting quantum interference device) により検出し(走査レーザ SQUID 顕微鏡法:L-SQ 法)、あるいは光電流により励起されるテラヘルツ電磁波を検出器で検出する(レーザテラヘルツ波顕微鏡法:LTEM 法)。レーザあるいは検出器を走査し、その位置座標と検出磁場強度の関係を像として出力することができ、更にこれをコンピュータで処理することにより、チップ表面の電流密度分布を算出することができる。

当研究グループは、平成 17 年度~20 年度、科学技術振興機構(JST) 先端計測分析技術・機器開発事業に採択された超 LSI 故障個所解析装置開発課題に、開発担当者として参画し、評価用チップの設計、故障箇所絞り込み支援ソフトウェアの開発を担当した。これにより、基本的なシミュレーション環境の構築、絞り込みが容易な故障についての診断手法を確立することができた。しかしながら、L-SQ 法における光電流の流れ、および LTEM 法におけるテラヘルツ電磁波の放射は、当初の予想を超えて遥かに複雑な現象であり、シミュレーションにより解析可能な事例は一部にとどまっており、故障絞り込み支援を行うことが困難な故障モードが存在する。L-SQ 法・LTEM 法のシミュレータを改良し、解析可能な事例を増やして、多種多様な故障モードについて故障絞り込み支援が可能ならぬ診断支援ソフトウェアを開発することができれば、この装置の応用範囲が飛躍的に広がり、LSI 故障診断の効率化、ひいては、LSI の高信頼化が期待できる。

2. 研究の目的

本研究は、超 LSI 故障個所解析装置を用い、高速・高精度に超 LSI の故障個所を絞り込むための故障診断支援手法を開発することを目的とする。研究では、まず、開発済みの

L-SQ 法・LTEM 法シミュレータの高速化に取り組む。次いで、高速化したシミュレータにより、種々の事例の解析を行い、故障箇所絞り込み支援が可能な故障モデルを増やす。これらを用いて、より適用範囲の広く、高速・高精度に故障個所の絞り込みが可能な、超 LSI 故障個所診断手法を開発する。

3. 研究の方法

本研究で用いる超 LSI 故障個所解析装置の外観を図 1 に示す。この装置での観測に用いる L-SQ 法の原理を図 2 に、LTEM 法の原理を図 3 に示す。



図 1. 超 LSI 故障個所解析装置の外観

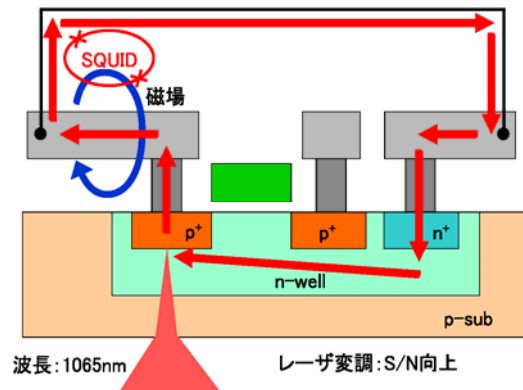


図 2. L-SQ 法の原理

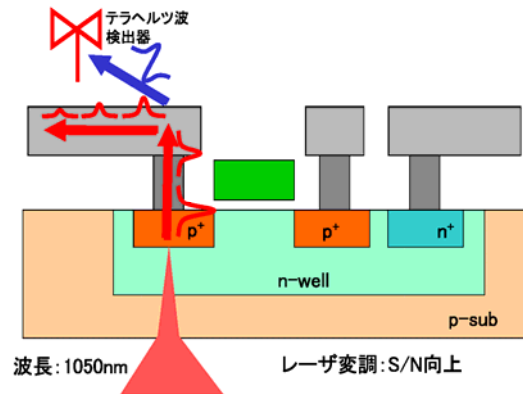


図 3. LTEM 法の原理

L-SQ 法での光電流シミュレーションでは、図 4 (a) に示す構造を有する回路の CAD レイアウトデータから、図 4 (b) に示すようなシミュレーション用ネットリスト(回路情報)を抽出し、SPICE 回路シミュレータによりシミュレーションする。SPICE シミュレータでは、シミュレーションする回路の素子数が増えると、急激に計算時間が増大する問題がある。この為、素子数の削減が計算時間削減に有効である。シミュレーション精度の低下を最小限に抑え、素子数を削減する方法として、以下の方法を用いる。

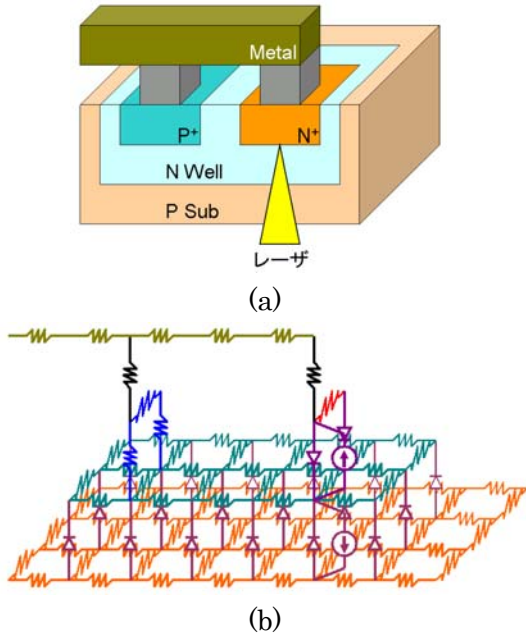


図 4. レイアウトデータと抽出される SPICE 回路の関係：(a) レイアウトデータ，(b) SPICE 回路

(1) 電流密度の分布は、レーザ照射点近傍で電流密度が高く、かつその変化が激しくなる。そこで、図 5 に示すように、電流が集中する箇所はメッシュを細かく、それ以外の場所は荒くする。

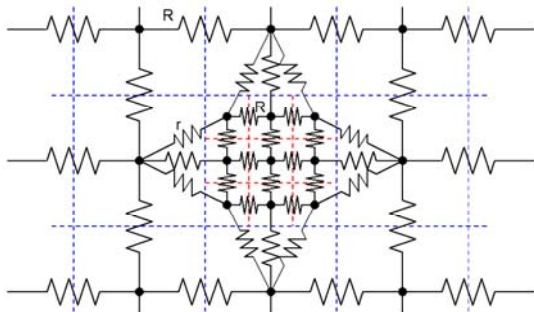


図 5. レーザ照射点近傍における等価回路メッシュサイズの変更

(2) 図 6 (a) に示すように複数のメッシュにまたがる配線抵抗は、図 6 (b) に示すよ

うにセグメントに分割し、一つのセグメントを一つの抵抗とすように変換する。

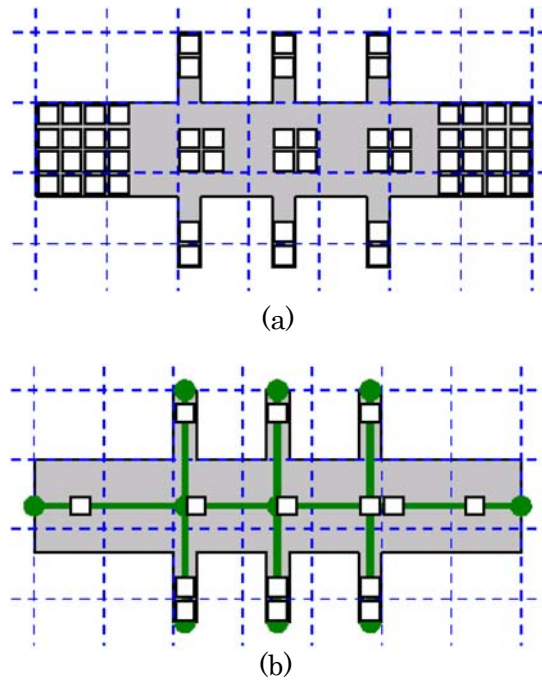


図 6. 配線から抽出される抵抗回路の簡略化

(3) 図 7 (a) に示すように、抵抗を下げ、信頼性を向上する目的で複数のコンタクト/ビアが打たれている箇所は、図 7 (b) に示すように、一つの抵抗に変換する。

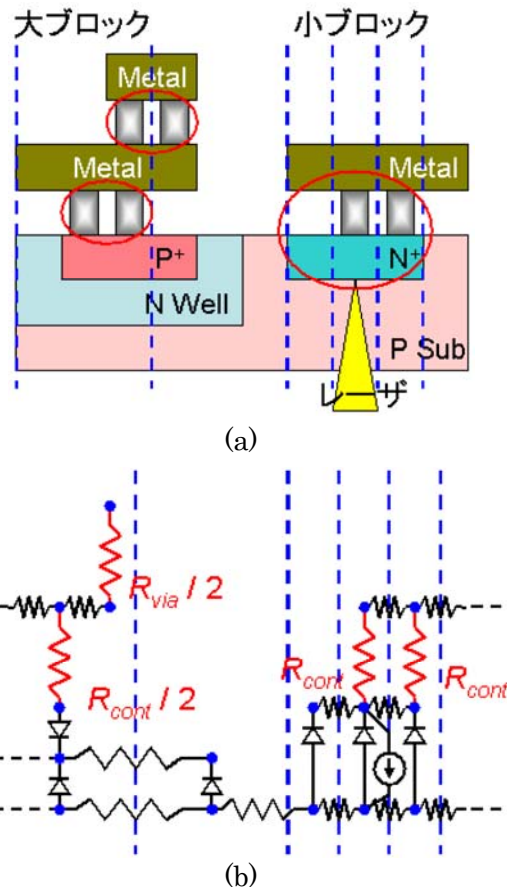


図 7. コンタクト/ビアから抽出される抵抗回路の簡略化

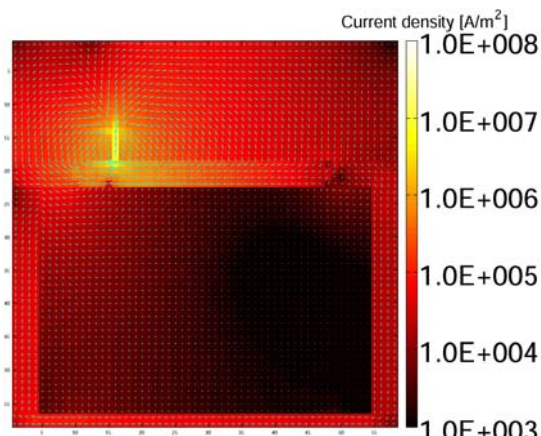
LTEM 法でのテラヘルツ電磁波放射シミュレーションでは、CAD レイアウトデータから、3 次元構造データを生成し、有限要素法による高周波電磁界シミュレーションソフトウェアを用いてシミュレーションする。種々の LSI 3 次元構造についてシミュレーション事例を積み重ね、テラヘルツ放射への寄与の大きい LSI 構造とそうでない構造を明らかにする。この結果から、テラヘルツ電磁波放射への影響の少ない 3 次元構造を簡略化することにより、高速化を検討する。また、並列計算による高速化も検討する。

L-SQ 法、LTEM 法共に、改良したシミュレータを活用し、シミュレーション事例を蓄積し、故障箇所絞り込み手法の開発を行う。シミュレーション結果と実チップの観測結果との比較検討も行う。

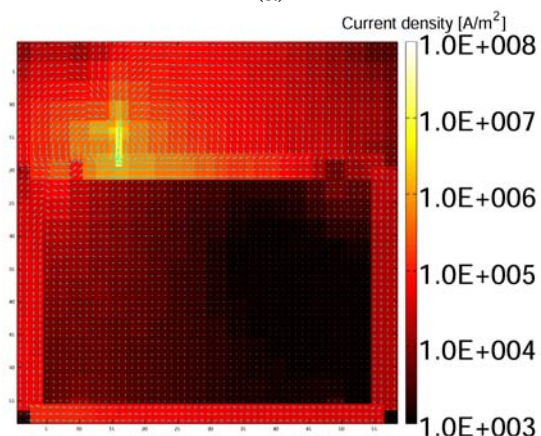
4. 研究成果

平成 21 年度は、主に、従来研究で開発したシミュレータの高速化改良に取り組んだ。L-SQ 法のシミュレータに関しては、研究方法の項で示した SPICE 回路の素子数削減の改良を行った。適用結果の一例を図 8 に示す。図 8 (a) が改良前のシミュレータによる結果で、図 8 (b) が改良後のシミュレータによる結果である。いずれも、レーザ照射による光電流の密度を示している。メッシュを荒くするなどして素子数を削減したことにより、精度が若干低下している様子が見て取れる。この様子が良く分かるよう、レーザ照射点を通るライン上のラインプロファイルを図 9 に示す。図 9 (a) が X 軸方向、図 9 (b) が Y 軸方向のプロファイルである。電流密度の平均誤差（電流密度の最大値で正規化した誤差の平均値）は 0.4% 未満と小さかった。また、分割領域数を変えて、計算時間の計測を行った結果を図 10 に示す。計算の高速化効果は回路の規模が大きい（分割領域数が多い）ほど高く、分割領域数が 2000 以上の場合で、100 倍以上の高速化効果が得られた。

LTEM 法に関しては、並列化シミュレータの利用による高速化を行った。16 プロセスを並列実行することで、約 10 倍高速化される事例を得た。

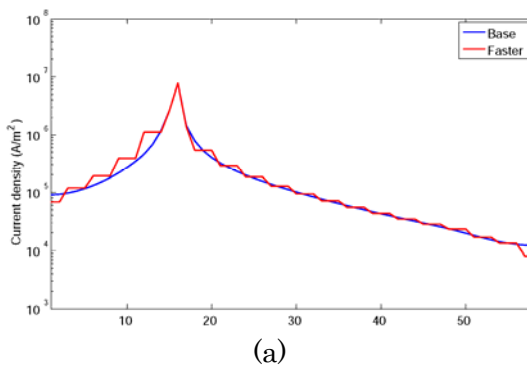


(a)

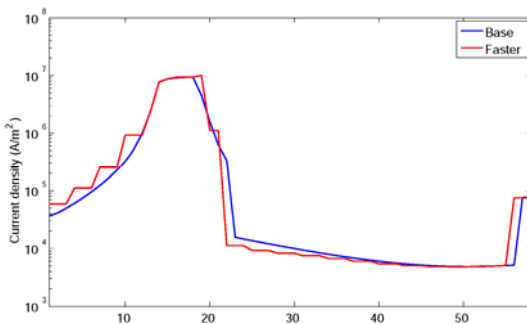


(b)

図 8. 走査レーザ SQUID 顕微鏡像シミュレーション結果：(a) 改良前、(b) 高速化改良後



(a)



(b)

図 9. 走査レーザ SQUID 顕微鏡像シミュレーション結果のプロファイル：(a) X 軸方向、(b) Y 軸方向

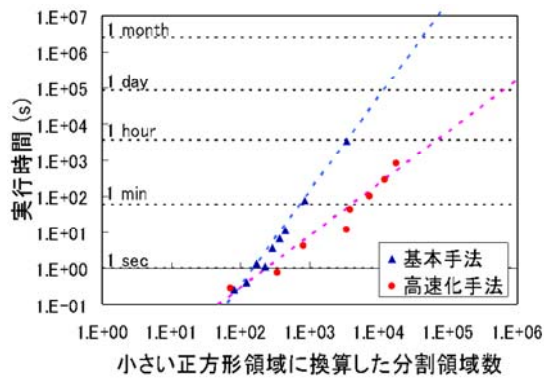


図 10. 走査レーザ SQUID 像シミュレーション時間の比較

平成 22 年度には、主に、前年度に改良した L-SQ シミュレータを用い、実チップのレイアウトデータを用いたシミュレーションを行い、この結果を実測結果と比較した。浜松ホトニクス社の協力を得て、超 LSI 故障箇所解析装置を用いて良品および不良品 LSI チップの L-SQ 像を取得した。シミュレーション結果と実測結果を比較したところ、合致する良好な結果が得られた。しかし、レーザ走査像においては異常コントラスト箇所と欠陥箇所が一致せず、SQUID 走査像においては空間解像度不足の為、観測画像から欠陥箇所を特定することは困難であった。そこで、シミュレータを活用した故障診断手法の検討を行った。レイアウトデータ (LSI 設計データ) から欠陥危険箇所を抽出し、そこへ欠陥を注入して L-SQ 像シミュレーションを行い、実測結果と比較を行う。欠陥危険箇所は複数あるので、それぞれについてシミュレーションおよび比較を行って、最も実測結果と良く合致する欠陥危険箇所を最終結果とする。この手法のソフトウェアを実装し、実チップに適用した。適用例を図 11 に示す。図 11 (a) が設計レイアウトデータ、図 11 (b) がこの設計データにより製造された実 LSI のレーザ反射像を示している。図中の赤い枠線が図 11 (a) のレイアウトの範囲に対応している。図中の赤点の位置にレーザを照射し、SQUID を走査して取得した良品 L-SQ 像を図 11 (c) に、不良品 L-SQ 像を図 11 (d) に示している。これら二つの像の差分を図 11 (e) に示す。この観測画像にもっとも良く合致したシミュレーション像を図 11 (f) に示す。このシミュレーション像生成時に挿入した故障は、正しい故障箇所 (LSI 製造時に意図的に作成した短絡故障箇所) であり、本手法により正しく故障箇所を指摘可能であることが示された。

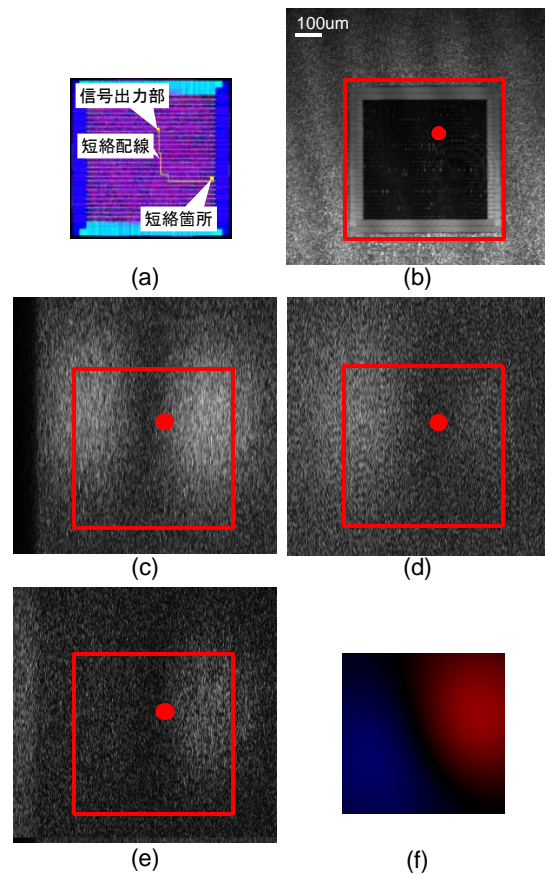


図 11. L-SQ 法を用いたによる故障診断支援法の適用結果：(a) 適用回路のレイアウト、(b) 反射レーザ像、(c) 良品の走査レーザ SQUID 像、(d) 不良品の走査レーザ SQUID 像、(e) 良品と不良品の差分、(f) 差分像のシミュレーション結果

平成 23 年度は、主に、LTEM 法を用いた故障診断支援法の検討を行った。本手法では、以下の手順で故障箇所の絞り込みを行う。

- (1) LSI 中で利用されている各標準セルについて、LTEM で観察した際の予測画像をシミュレーションにより生成し、データベースに格納する。
- (2) LSI の設計レイアウトデータから、各標準セルの配置座標、接続されている配線の方向・長さに関する情報を抽出する。
- (3) データベースから標準セルの予測画像を検索し、セル配置座標、配線の方向・長さに関する情報を用いて予測画像の補正を行う。
- (4) LTEM 観測画像から、各標準セル領域を切り出し、これを補正済み LTEM 予測画像と重ねて、相互相関係数を算出する。
- (5) 正常品の観測画像と故障品の観測画像の双方について、相互相関係数の算出を行い、(正常品の相互相関係数 - 故障品の相互相関係数) の大きい順に標準セルをランキングする。

本手法を、標準セル設計ランダムロジック

回路ブロックを有する評価用LSIに適用した。この結果を図12に示す。図12(a)は回路中で用いられている標準セルレイアウトの例を、図12(b)はこの標準セルのLTEM像シミュレーション結果を示している。図12(c)はLTEM法で観測した実観測画像を、図12(d)はこれに対応するシミュレーション画像である。開発した診断支援手法により診断を行ったところ、目視での故障絞り込みが極めて困難な本事例について、回路全体の8%の領域まで故障を絞り込むことができた。

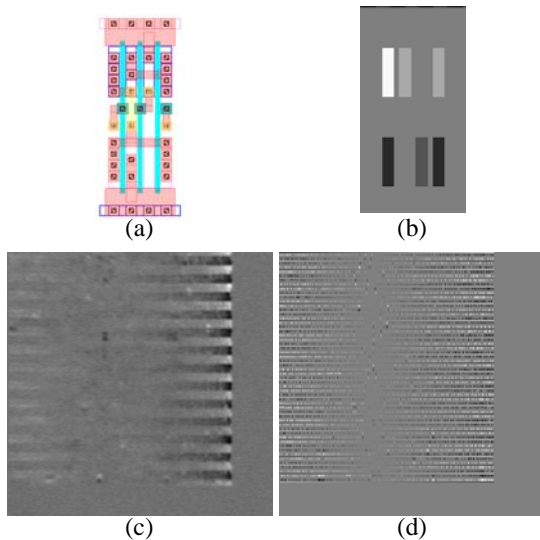


図12. LTEM法を用いた故障診断支援法の適用結果：(a) 標準セルのレイアウト、(b) 標準セルのLTEMシミュレーション画像、(c) 実観測画像、(d) LTEMシミュレーション画像

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計7件)

- [1] 三浦克介, 御堂義博, 山下将嗣, 松本 徹, 二川 清, 中前幸治, “走査レーザ SQUID 顕微鏡および LTEM 複合故障箇所解析装置の為の故障データベースと故障絞り込み支援ソフトウェアの開発”, 第31回 LSI テスティングシンポジウム会議録, pp. A17-A22 (9-11 Nov. 2011).
- [2] 御堂義博, 山下将嗣, 松本 徹, 二川清, 中前幸治, “LSI 故障解析のためのレーザテラヘルツエミッション顕微鏡 THz 波検出信号シミュレーション (II)”, 第31回 LSI テスティングシンポジウム会議録, pp. A23-A28 (9-11 Nov. 2011).
- [3] 三浦克介, 二川 清, 中前幸治, “電流密度分布シミュレーションを用いた走査レーザ SQUID 顕微鏡による VLSI 診断

法”, 第30回 LSI テスティングシンポジウム会議録, pp. 187-192 (10-12 Nov. 2010).

- [4] 御堂義博, 山下将嗣, 松本 徹, 二川清, 中前幸治, “LSI 故障解析のためのレーザテラヘルツエミッション顕微鏡 THz 波検出信号シミュレーション”, 第30回 LSI テスティングシンポジウム会議録, pp. A9-A14 (10-12 Nov. 2010).
- [5] 御堂義博, 山下将嗣, 松本 徹, 斗内政吉, 二川清, 中前幸治, “LTEM による LSI 故障解析のための THz 波シミュレーション (II)”, 第57回応用物理学会関係連合講演会, 19p-L-9 (17-20 Mar. 2010).
- [6] 三浦克介, 二川清, 中前幸治, “走査レーザ SQUID 顕微鏡によるシミュレーションを活用した VLSI 故障絞り込み法”, 電子情報通信学会総合大会, C-12-66 (16-19 Mar. 2010).
- [7] 三浦克介, 中前幸治, 二川清, “電流密度分布シミュレーションを用いた走査レーザ SQUID 顕微鏡による VLSI 診断法の検討”, 第29回 LSI テスティングシンポジウム, pp. 239-244 (11-13 Nov. 2009).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三浦 克介 (MIURA KATSUYOSHI)
大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号：30263221

(2) 研究分担者

御堂 義博 (MIDOH YOSHIHIRO)
大阪大学・情報科学研究科・助教
研究者番号：00448094