走査レーザ SQUID 顕微鏡による LSI の検査・故障解析

二 川 清

NEC エレクトロニクス(株) 川崎市中原区下沼部 1753 (E-mail: k.nikawa@necel.com)

(2003 年 7 月 24 日受理)

Inspection and Failure Analysis of LSIs using Scanning Laser-SQUID Microscopy

Kiyoshi NIKAWA

NEC Electronics Corporation, 1753 Shimo-numabe, Nakahara-ku, Kawasaki 211-8668

(Received July 24, 2003)

Synopsis: Scanning laser-SQUID microscopy (SLSM) is a newly developed technique. Only three groups in the world have published their experimental results. In this review paper, we provide an explanation of SLSM, and discuss the advantages of SLSM over conventional techniques including how to apply SLSM to LSI inspection (identification of bad chips) and LSI failure analysis (fault site isolation on chips). Our first SLSM machine showed a spatial resolution of $1.3\ \mu\text{m}$ using a 488-nm-wavelength laser, and our second SLSM machine showed a spatial resolution of $0.89\ \mu\text{m}$ when irradiating a 1,064-nm-wavelength laser from the backside of a Si wafer. Irradiation from the backside of a wafer makes it possible to irradiate all p-n junctions of an LSI, which is expected to increase the efficiency of inspection and analysis. The possibility of in-line inspections was demonstrated in a general case. The possibility of failure analysis was demonstrated in a special case.

Keywords: laser, SQUID, LSIs, defective chip, fault site isolation

1. はじめに

走査レーザ SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) 顕微鏡法はレーザビームを照射した際に発生する磁場を超高感度の磁気センサである SQUID 磁気センサを用いて検出することで、従来の方法では見えないものを見よう、という意図のもとに考案された手法である。その最大の特長は、完全に非破壊かつ非接触でイメージングし、光電流に関係した特性を観測できることである。

歴史は非常に浅く、筆者らを含め世界で 3 グループのものが公表されているのみである。ドイツの Beyer らのグループは Si ウェハ中の濃度分布を非接触で観測することを試みている。低温超伝導 SQUID 磁束計を用い、 $20\ \mu\text{m}$ 程度の走査ステップでイメージングすることに成功している¹⁾。日本の Daibo らのグループは Si 基板中の p-n 接合を非接触で観測することを試み

ている。高温超伝導 SQUID グラジオメータを用い $20\ \mu\text{m}$ 程度の走査ステップでイメージングするのに成功している²⁾。

筆者らは走査レーザ SQUID 顕微鏡法を LSI の検査・故障解析に利用できないかと考え検討を行っている。最初に試作した装置では可視レーザ (波長 488 nm) を用いて、LSI チップ表面からレーザを照射し、分解能が $1.3\ \mu\text{m}$ でのイメージングに成功し、LSI の検査・故障解析に適用可能な分解能があることを確認した。さらに、検査 (不良チップの識別) にも故障解析 (チップ上の故障個所の識別) にも適用できる可能性があることをデモンストレーション実験で示した³⁻⁷⁾。2 度目に試作した装置では波長 1,064 nm という、Si での吸収は少ないが光電流は発生する波長のレーザを用いた。Si ウェハの裏面側から Si 基板を通して Si 基板表面付近にレーザビームをフォーカスすることで、LSI 中の全ての p-n 接合へのレーザ照射とそこでの光電流

発生を可能とした。この装置ではサブミクロンの空間分解能でのイメージングに成功した⁸⁾。

本稿では、走査レーザ SQUID 顕微鏡の原理と得られる像の特徴、応用可能範囲について、筆者らの結果を中心に解説する。また、走査 SQUID 顕微鏡との違いについても空間分解能と感度面から概観する。

2. 走査レーザ SQUID 顕微鏡の原理

Fig. 1 に走査レーザ SQUID 顕微鏡の原理を簡単に示す。図中サンプルとして LSI チップを示したが、現在のところ LSI チップを対象としているのは我々のグループのみである³⁻⁸⁾。Beyer らは生の (p-n 接合も配線も無い) Si ウェハをサンプルに用いている¹⁾。また、Daibo らは Si 基板に p-n 接合のみを形成した (配線の無い) サンプルを用いている²⁾。レーザビームを LSI チップに照射すると光電流が流れる。光電流が流れることで磁場が発生する。この磁場を DC-SQUID 磁束計で検出する。サンプルを走査しながら DC-SQUID 磁束計で検出された磁場を表示することで像が得られる。この像を走査レーザ SQUID 顕微鏡像と呼ぶ。

この原理から分かるように像の空間分解能はレーザビームの径程度となるため、サブミクロンの空間分解能が可能である。Beyer らや Daibo らはレーザビームをそれほど絞らず、イメージングの際のステップも 20 μm 程度と荒くしたため、走査レーザ SQUID 顕微鏡像の空間分解能は 20 μm よりかなり悪い^{1, 2)}。我々は、最初に試作した装置 (1 号機と呼ぶ) ではレーザビー

ムを 1 μm 程度まで絞り、空間分解能 1.3 μm の走査レーザ SQUID 顕微鏡像を得た³⁻⁷⁾。また、最近試作した装置 (2 号機と呼ぶ) では 0.9 μm 程度の空間分解能を得た⁸⁾。固浸レンズ (Solid immersion lens) を用いることで、光学的に 0.2 μm 以下の空間分解能が得られることが最近報告されている。走査レーザ SQUID 顕微鏡像においても、この程度の空間分解能までは改良することが可能と考えている。固浸レンズの応用については後ほどより詳細に述べる。

走査レーザ SQUID 顕微鏡像を得るためには、レーザビームと SQUID 磁気センサは固定し、サンプルを走査するのが基本である。Beyer らと Daibo ら、さらに筆者らの 1 号機、2 号機においてはこの方法を用いている。ただ、サンプルを走査するには時間がかかる。そこで筆者らは、2 号機においてはレーザビームも走査できるようにし、短時間での観測を可能にした。

SQUID 磁気センサとして Beyer らは低温超伝導タイプの DC-SQUID 磁束計を、Daibo らは高温超伝導タイプの DC-SQUID グラジオメータを用いている。筆者らは、1 号機、2 号機とも高温超伝導タイプの DC-SQUID 磁束計を用いた。

SQUID 磁気センサとサンプルの距離は近いほど、発生した磁場を強い箇所検出できるため、高感度の観測ができる。Beyer らと Daibo らはともに 1 cm 以上離しているが、筆者らは 1 号機、2 号機とも、1 cm 以下の距離を実現することで高感度化に成功した。特に、1 号機においては、SQUID 磁気センサとサンプルをともに真空中に入れ、その間を真空断熱することで 0.5 mm 程度まで接近させ走査レーザ SQUID 顕微鏡像を取得することに成功した。

対象となる磁場信号は極めて微弱であるため、環境磁場ノイズに埋もれた磁場信号を検出する必要がある。我々の実験室における環境磁場ノイズは μT オーダである。一方、検出したい磁場の下限は高温超伝導 DC-SQUID 磁束計の検出限界である pT オーダである。このようにノイズの方が信号より 6 桁も大きい状況で磁場信号を検出するために、2 つの手段を併用した。まず、パーマロイ板で SQUID およびサンプルの周囲を囲うことで、SQUID 近傍の磁場ノイズを 3 桁程度低減することができた。残った nT オーダの磁場ノイズの中で pT オーダの磁場信号を得るためには、Fig. 2 に示すようなレーザ変調とロックインアンプを組み合わせる方法を用いた。スペクトルアナライザで環境磁場ノ

Fig. 1 The principle of scanning laser-SQUID microscopy.

Fig. 2 Laser modulation & lock-in amplifier.

Fig. 3 Basic concept of the application of laser-SQUID microscopy to LSIs.

イズのスペクトルを観測し、磁場ノイズが小さい周波数を調べる。その周波数でレーザに強度変調をかけ、SQUID 磁束計の出力の中からその変調周波数の信号のみをロックインアンプを通して取り出す。このようにして、総合ノイズとしては nT オーダの磁気シールド内の環境磁場ノイズの中から、レーザ励起により発生した pT オーダの磁場信号を検出することができた。

3. LSI への適用の可能性とそのメリット

走査レーザ SQUID 顕微鏡法を LSI の検査・故障解析へ適用する場合の典型的なケースを概念的に Fig. 3 に示す。p-n 接合にレーザビームが照射され、その結果閉回路に光電流が流れると磁場が発生する。LSI 内部には多くの p-n 接合があるのでこのような場合は実現しやすい。

LSI への適用法は大きく分けてふたつある。正常なチップと異常なチップを見分けること（検査）と、異

Fig. 4 Position of a laser-SQUID microscope in nondestructive analysis methods for LSIs.

常なチップ内部の異常個所を検知すること（故障解析）である。正常な場合に閉回路が存在するケースでは、断線や、高抵抗が発生した際には、この閉回路に流れる電流が流れなくなったり、減少したりするため、発生する磁場が変化する。逆に、正常な場合にはこのような閉回路が存在しないケースでは、ショートやリークが発生した際に閉回路が形成されることで光電流が流れ磁場が発生する。このように、走査レーザ SQUID 顕微鏡法を LSI の検査・故障解析に適用できる可能性があることが分かる。現在の LSI は配線の多層化が進んでいるため（最先端 LSI では 2002 年で 8 層、2005 年で 10 層⁹⁾）、配線部の故障が Si 部の故障より多く、このような配線部の異常検出を主体とした走査レーザ SQUID 顕微鏡法の適用が有効と考える。

走査レーザ SQUID 顕微鏡を用いた検査・故障解析を従来法と比較して Fig. 4 に示す。現在のように配線が多層になり製造工程数が多くなると、最終工程後の電気的試験で不良が発見されるのでは、作り直しの時間がなく、ユーザの希望納期に間に合わないという事態が多発することになる。また、LSI のニーズの多様化に伴い少量多品種の LSI が増加し、1 ロットで全ての需要を満たせる場合が増えている。そのような場合はバックアップが存在しないことになり、このような

事態に拍車をかけている。このような事態を避けるためには、工程途中で検査できることが望ましいが、現状では、この種の検査は光を用いたパタン欠陥検査法 (Pattern defect inspection) が主であり、そこで検出される欠陥が電氣的に異常かどうかの判断は欠陥の大きさや位置から推定するにとどまり、直接的な電氣的検査はできない。最近使用され始めている電子ビームを用いた検査装置を用いればある程度の電氣的欠陥の検出は可能であるが、多くの制限があり、まだまだ十分とは言えない。走査レーザ SQUID 顕微鏡を用いれば、配線工程 (Interconnect process) (最先端の LSI では全工程の半分以上を大きく上回る) に入ってからではあるが電氣的に検査できる可能性があるためその実用性の有無は検討に値する。

ウェハ (Wafer) 工程が終われば、機械的探針やパッケージのピンを通して、チップは電氣的に計測することが可能となり、従来の各種故障解析手法での解析が可能となる。IR-OBIRCH (Infrared Optical Beam Induced Resistance Change) 法やエミッション顕微鏡 (Emission microscope) 法、電子ビームテスタ (EB tester) 法といった従来の故障解析手法¹⁰⁾を使用すれば故障解析が可能であるが、これらの従来手法にも、現在の大規模化する LSI を解析する際に抱えている課題が多くある。大きな課題の 1 つはパッド数・ピン数の増大である (最大ピン数は 2002 年で約 1,900 ピン、2005 年で約 2,500 ピン⁹⁾)。このような多くのパッド・ピンをハンドリングすると接触不良や機械的探針破損・ピン破損などにより、効率面・信頼性面・コスト面で多くの問題が生じる。走査レーザ SQUID 顕微鏡を用いることができれば、パッドへの探針やピン接続が不要なため、これらの問題を回避できる。

4. 走査レーザ SQUID 顕微鏡の試作と実験検討

4.1 1号機の試作と実験検討³⁻⁷⁾

Fig. 5 に 1 号機の概要を示す。SQUID チップ、試料台、対物レンズは、パーマロイの円筒で 3 重に覆うことで、外部からの磁場をシールドし、それら全体はステンレス製真空チャンバー内に配置した。実験を重ねる中で磁気シールドは 1 重でも問題のないことが分かり、1 重に変更した。SQUID チップ、試料台、対物レンズは、各々独立に移動できる (図では移動に関連した機構は大幅に省略してある)。試料は右側の予備排気室 (Sample exchange chamber) を通して出し入れする。予備排気室の対面にある試料台を支持する棒は左側で

真空外に出ており、真空外のステッピングモータにより、大領域の x-y 走査ができる。ステッピングモータによる走査範囲は磁気シールドを 3 重にしていたときは、最大 7 mm² であったが、磁気シールドを 1 重にすることで内部空間が広がり、18 mm² まで拡大できた。小領域の x-y 走査に用いるピエゾ素子は試料台近傍の左側にある。ピエゾ素子による走査範囲は最大 100 μm^2 である。対物レンズは試料出し入れ棒と直角方向にスライドすることにより、交換できる (図の手前側で手動操作する)。

チップ表面の光学的観察は 2 通りの方法で行う。

(1) 白色光反射像：白色光を真空チャンバー下面の窓から導入し、その反射像を得る。(2) レーザ走査像：試料走査時に、下面の窓から導入したレーザビームの試料表面での反射光をフォトダイオードで検出することにより得る。レーザは最初波長 488 nm のものを用いていたが、後に 1,064 nm のものも追加し、両波長での観測が可能となった。白色光反射像はチップ上の観察位置を決める際や、SQUID チップの位置を決める際に用いる。レーザ走査像は走査レーザ SQUID 顕微鏡像取得の際同時に取得することで、走査レーザ SQUID 顕微鏡像のコントラストのチップ上での位置を正確に知ることができる。

SQUID チップはサファイア棒の先端に、下向きに固定され、サファイア棒は真空外から供給される液体窒素素により冷却されている。試料および SQUID チップ

Fig. 5 Main part of the first system.

の位置を側面から観察するための窓は図の手前側にある(図では省略)。試料を交換する際は直接肉眼で観察する。SQUID チップと試料表面の距離を調整する際は、顕微鏡で拡大しTVモニターで観察する。

走査系はユニソク製の STM (Scanning Tunneling Microscope, 走査トンネル顕微鏡) 用の走査ユニットに改造をほどこしたものを利用した。レーザに強度変調をかけ、SQUID 磁束計の出力をロックインアンプに入れ、ロックインアンプの出力を STM 用表示ユニットに入力することで像を得た。

SQUID 磁束計は住友電工製の SEIQUID II を一部改良したものを用いた。超伝導体は Ho-Ba-Cu-O ($T_c \sim 90$ K) でジョセフソン接合は段差により作製されている。磁束計の磁場捕獲実効面積は 0.2 mm^2 である。磁場分解能は、住友電工での SQUID 単体での計測では、10 Hz で $1.9 \text{ pT/Hz}^{1/2}$, 1 kHz で $0.32 \text{ pT/Hz}^{1/2}$, 磁束換算で、10 Hz で $190 \mu \Phi_0/\text{Hz}^{1/2}$, 1 kHz で $31 \mu \Phi_0/\text{Hz}^{1/2}$ である (Φ_0 : 磁束量子)。我々の装置に搭載し走査レーザ SQUID 顕微鏡像を取得する際の周波数は外部ノイズの谷間を選んでいる。本報告で示す走査レーザ SQUID 顕微鏡像は 8.3 kHz で観測した。その時の磁束分解能は $30 \mu \sim 60 \mu \Phi_0/\text{Hz}^{1/2}$ であった。

1 号機で観測した例を 2 つ示す。

Fig. 6 は故障解析への適用可能性を示すとともに、

(a) Scanning laser-SQUID microscope image

(b) Laser-scanning microscope image

Fig. 6 Demonstration of the application to failure analysis.

1 号機での空間分解能を示した例である。サンプルは LSI の TEG (Test Element Group, 通常の LSI と同一工程で LSI の基本構造を作りこんだチップ) で、MOS (Metal Oxide Semiconductor) トランジスタ用のゲート酸化膜が静電気により破壊された個所が電流経路の一部となりその近傍に p-n 接合があったため、ゲート破壊個所が検出できたものである。TEG を搭載したプリント基板上でショートすることにより、MOS トランジスタ用の p-n 接合部を含む閉回路が形成され、走査レーザ SQUID 顕微鏡像でのコントラストが得られた。Fig. 6(a)が走査レーザ SQUID 顕微鏡像、Fig. 6(b)がそれに対応した個所のレーザ走査顕微鏡像である。Fig. 6 (a)から空間分解能(半値幅)が $1.3 \mu\text{m}$ あることが分かる。

Fig. 7 は LSI 製造工程途中で断線不良チップが識別できること(検査できること)を示した例である。サンプルは 2 層目配線用の Al を蒸着した後、パタニングせずに、抜き取った。まず、Fig. 7(a)に示す走査レーザ SQUID 顕微鏡像を取得した。次に、同一サンプル内で、Fig. 7(a)のコントラストの原因となった配線をレイアウト設計データから探し、その内の 2 箇所を FIB (Focused Ion Beam, 集束イオンビーム) 装置で断線させた。そのサンプルで取得した走査レーザ SQUID 顕微鏡像が Fig. 7(b)である。FIB で断線させた個所に対応した個所でコントラストが消失しているのが分かる。この例では、Fig. 7(a)の状態では、パタニングされた 1 層目の Al 配線とパタニング前の 2 層目 Al 膜が電流経路の一部を形成していた。FIB で 1 層目 Al 配線を断線させることにより、その電流経路が開放となり、電流が流れなくなったために、走査レーザ SQUID 顕微鏡像でのコントラストが消失した。

(a) Before FIB cut

(b) After FIB cut

Fig. 7 Demonstration of inspection application.

(a) Before setting a wafer

(b) After setting a wafer

(c) During observation

Fig. 8 Photos of the second system.

4.2 2号機の試作と実験検討⁸⁾

実際の LSI では、p-n 接合の多くは配線の下に陰になるように配置されており、配線の層数も年々増加しているため（2002 年で 8 層、2005 年で 10 層⁹⁾）、ウェハ表側からのレーザ照射だけで光の当たる p-n 接合の割合は極めて少ない。一方、ウェハ裏側から照射すると、全ての p-n 接合に光を当てることが可能である。2 号機では、ウェハの裏側からのレーザビーム照射で高空間分解能を得ることのできる構成を実現した。使用す

るレーザの波長としては、Si 中での吸収が少なく、なおかつ p-n 接合部で十分な光電流を発生する 1,064 nm を選んだ。光学系、走査方法、試料台なども全て 1 号機とは異なる方法を採用した。現在量産されている LSI に適用した結果、サブミクロンの空間分解能を示すレーザ SQUID 像が得られた。

また、2 号機において、初めて同一装置を用いて走査レーザ SQUID 顕微鏡像と走査 SQUID 顕微鏡像を得ることが可能となった。両者の比較を行うことで、走査レーザ SQUID 顕微鏡法により、実際に 3 桁も空間分解能が向上することを初めて示すことができた。

2 号機の外観写真を構成（概念）図とともに Fig. 8 に示す。Fig. 8(a)では直方体の磁気シールドの中央にセラミックの試料台が見える。この状態でウェハ、チップなどのサンプルを試料台に配置し、真空チャックなどで固定した後、円筒形の磁気シールド部下の SQUID チップ直下までスライドさせた後（Fig. 8(b)）、レーザを下方から照射し観測する。観測中は磁気シールドの蓋を閉める。円筒形磁気シールドの手前側の半円筒蓋（Fig. 8(a)(b)では内部が見えるようにはずしてある）も観測中は閉じる（Fig. 8(c)）。

SQUID 部は 1 号機と同じものを用いた。

2 号機的设计に当っては、1 号機での欠点を改良するように、以下のような点に留意した。

(1) 光学系は、LSI の故障解析で我々が長年使用した実績のある、共焦点赤外レーザ走査顕微鏡をベースに作成。これにより回折限界に近い空間分解能が可能となった。

(2) レーザ変調周波数は最大 100 kHz: 従来は 10 kHz 以下。

(3) 狭領域（数百 μm 以下）走査は、ガルバノ・ミラーによるレーザ走査：従来はピエゾ素子によるサンプル走査、広領域走査は、超音波モータ駆動（磁場発生微少）によるセラミックステージ走査：従来はステッピングモータ駆動（磁場発生大）による樹脂基板ステージ走査。

(2) と (3) により像取得時間が大幅に短くなった。

(4) 300 mm Φ のウェハが搭載できる試料台。

(5) SQUID 部のみ真空中に配置し、他は全て大気中に配置：従来は SQUID、サンプルとも真空中に配置したため、サンプルのハンドリングに大きな制限があった。2 号機ではサンプルのハンドリングは効率的になったが、SQUID・サンプル間距離の増加により感度を犠牲にすることとなった。

Fig. 9 A scanning SQUID microscope.

Fig. 10 A scanning laser-SQUID microscope.

2号機で取得した走査SQUID顕微鏡像と走査レーザSQUID顕微鏡像の分解能を比較する。まず、Fig. 9に走査SQUID顕微鏡像を示す。サンプルはFig.9(b)に示したプリント基板上に作成したループ状の配線で、そこに外部電源により周波数 100 kHz、振幅 20 μ A の正弦波の電流を流した。試料台を走査することにより取得した走査SQUID顕微鏡像がFig. 9(a)である。このように走査SQUID顕微鏡像では空間分解能は mm のオーダーである。

走査レーザSQUID顕微鏡像をFig. 10に示す。サンプルは製造工程途中から抜き取った最先端LSIである。レーザビームを走査し取得した走査レーザSQUID顕微鏡像がFig. 10(a)である。像の右下部に縦線で示した個所の強度のラインプロファイルをFig. 10(b)に示した。半値幅で約 0.9 μ m が得られている。これはレーザ波長 (1,064 nm) と使用した対物レンズの NA (0.76) から計算した回折限界値 0.7 μ m にかかなり近い。

5. 走査レーザSQUID顕微鏡と走査SQUID顕微鏡の比較

Fig. 11 に今までに報告されている走査レーザSQUID顕微鏡と走査SQUID顕微鏡の結果を、磁場感

Fig. 11 Spatial resolution vs. sensitivity.

度と空間分解能の観点から整理して示す。もちろん走査SQUID顕微鏡と走査レーザSQUID顕微鏡は各々の用途が異なるので一概に比較できるものではないが、ここでは、全体を概観するために、このような比較を行ったものである。

低温超伝導SQUIDを用いたものを黒い菱形で、高温超伝導SQUIDを用いたものを白抜き菱形で示す。横軸が空間分解能、縦軸が磁場検出感度である。まず、走査SQUID顕微鏡をみると、我々の2号機ではmmオーダーの空間分解能(図のプロットで横軸の位置は大まか)しか得られなかったが、感度は約 0.5 pT/Hz^{1/2}と、高温超伝導にははかり良い。Chatrathornら¹¹⁾、Kirtleyら¹²⁾、Morookaら¹³⁾は空間分解能を上げるために磁場検出感度を犠牲にしていることが分かる。一方我々は、走査レーザSQUID顕微鏡法を用いることによって、感度は約 0.5 pT/Hz^{1/2}に保ったままで、空間分解能を約 0.9 μ m にまで上げることができた。

6. 走査レーザSQUID顕微鏡法の課題

以上見てきたように、走査レーザSQUID顕微鏡は走査SQUID顕微鏡にはない特徴、また従来のLSI検査・故障解析装置にはない特徴をもっている。ただ、まだ歴史は浅く、研究例も少ないため、基礎データも不足しており、その応用に関しても未知の点が多い。

ここでは、筆者がLSIへ応用する際に課題ととらえている点をあげる。また、一部はその解の候補も示したいと思う。

まず、検査(異常チップの識別)への応用である。

Fig. 7 のデモンストレーション実験で示したように、基本的には適用可能と考える。残された課題は検査時間と検出可能不良の実証の蓄積である。2 号機ではレーザビームを走査することで短時間（1 分以下）での像取得が可能であることを示したが、走査領域の一边が数百 μm を超えるような場合には、レーザビームを走査するとレーザビーム照射位置と SQUID の距離が離れ感度が悪くなる。このため試料台を高速に走査する方法も開発する必要がある。また今後は、検出可能な不良の事例を積み上げていく必要がある。

検査ができることは示されたが、故障解析ができる（チップ内の異常箇所を検知する）ことは、Fig. 6 のように異常（この場合はショート）のある箇所と p-n 接合が隣接している特殊な場合を除いては、その実用的方法が見出せていない。今後の大きな課題である。

次に、故障解析の際に特に重要になる空間分解能の限界について考える。空間分解能の限界は光の回折限界で決まる。回折限界はおおよそ $\lambda/(2NA)$ である（ λ ：波長、NA：開口数、 $NA = n \sin \theta$ 、 n ：屈折率、 θ ：集光角の半値）。Ippolito らは、Si 基板を通して観測する際、Si 基板に半球形の Si レンズを密着させることで、回折限界が $\lambda/(2n)$ まで可能であることを示し、実験で $0.23 \mu\text{m}$ の空間分解能が得られることを示した¹⁴⁾。さらに、Koyama らは Si 基板を半球状に加工することで、 $0.18 \mu\text{m}$ の空間分解能を得ることに成功した（配線ピッチが $0.18 \mu\text{m}$ ）¹⁵⁾。これが得られたレーザの波長は $1,300 \text{ nm}$ であるので、我々の走査レーザ SQUID 顕微鏡のように $1,064 \text{ nm}$ のレーザを用いれば、さらに高空間分解能が期待できる：理論限界は $0.15 \mu\text{m}$ 。LSI への適用を考えた場合、ここで紹介した配線系の解析を考えると、配線の最小ピッチの今後の推移が目安となる。半導体国際技術ロードマップによると、2003 年では 245 nm であるが、2005 年には 185 nm 、2007 年には 150 nm と示されている⁹⁾。従って、2007 年以降は走査レーザ SQUID 顕微鏡では固浸レンズを用いても、最先端 LSI の解析が困難となる。近接場光の適用ができれば、回折限界以上の高空間分解能が可能である¹⁶⁾。ただ、近接場光を走査レーザ SQUID 顕微鏡へ適用できる見込みは今のところ無い。TEG を活用するなど、間接的な方法が必須になろう。

試作・評価にあたり、物質・材料研究機構の糸崎秀夫氏、(株)ユニソクの長村俊彦氏、山中重宣氏、上辻嘉雄氏、浜松ホトニクス(株)の松本徹氏、寺田浩敏氏、石塚利道氏、青木芳充氏、住友電工ハイテックス(株)の永石竜起氏、京セラ(株)の明石幸治氏、TDI の井上彰二氏、中山英夫氏、NEC エレクトロニクスの池田和子氏、小西永二氏、津田浩嗣氏、角原由美氏、福井広己氏、柳澤政美氏、NEC 九州の藤戸一三氏、NEC 山口の一二三晴美氏、そのほかにも大勢の方々にご協力・ご支援をいただきました。深謝します。

参 考 文 献

- 1) J. Beyer, H. Matz, D. Drung and Th. Schurig: Appl. Phys. Lett. **74** (1999) 2863
- 2) M. Daibo, T. Kotaka and A. Shikoda: Physica C **357-360** (2001) 1483
- 3) 二川 清, 井上彰二: LSITS テスティングシンポジウム (2000) 203
- 4) 二川 清, 井上彰二: 信学技報 ICD2000-174 (2000) 1
- 5) 二川 清, 井上彰二: LSITS テスティングシンポジウム (2001) 215
- 6) K. Nikawa and S. Inoue: Int. Reliab. Phys. Symp., IEEE (2001) 289
- 7) K. Nikawa: IEICE Trans. Electron. **E85-C**, 3 (2002) 746
- 8) 二川 清, 井上彰二: LSITS テスティングシンポジウム (2002) 275
- 9) The International Technology Roadmap for Semiconductors, <http://public.itrs.net/>
- 10) 二川 清: はじめてのデバイス評価技術, 工業調査会 (2000) 71
- 11) S. Chatrathorn, et al.: Appl. Phys. Lett. **76** (2000) 2304
- 12) J.R. Kirtley, et al.: Appl. Phys. Lett. **66** (1995) 1138
- 13) T. Morooka, et al.: Physica C **335** (2000) 157
- 14) S.B. Ippolito, B.B. Goldberg and M.S. Unlu: Appl. Phys. Lett. **78** (2001) 4071
- 15) T. Koyama, et al.: Int. Reliab. Phys. Symp., IEEE (2003) 529
- 16) K. Nikawa, et al.: Appl. Phys. Lett. **74** (1999) 1048