デュアルカメラ技術を基礎とした スペックル干渉計測による電子デバイスの変形計測*

新井泰彦** 竹川 徹*** 平井宏之† 横関俊介††

Deformation Measurement of Electronic Device Using Speckle Interferometry Based on Dual-Camera Technique

Yasuhiko ARAI, Toru TAKEGAWA, Hiroyuki HIRAI and Shunsuke YOKOZEKI

The speckle interferometer based on multi camera technology using two cameras is applied to a dynamic measurement in this paper. A phenomenon that the package of an electronic device is deformed while running is investigated by the novel technique. To perform high precise measurement by this method, the optimum conditions for measurements are also discussed concerning the size of speckle and the frequency of carrier signal. The deformation process of the object can be analyzed high-resolution. Under the optimum conditions, the deformation process of the package during the operation of an operational amplifier is measured. Then, the local maximum deformation can be estimated as 150nm from experimental results. From the results, it can be also confirmed that electronic devices are deformed by the stress of a heat by an operation every second during the operating time.

Key words: electronic speckle pattern interferometry, dynamic measurement, high resolution measurement, out-of-plane deformation measurement, deformation of electronic device

1. はじめに

1970 年代初頭より、スペックルを用いた変形計測法として CCD をはじめとする TV カメラによる ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry)^{1)~5)} が利用され、さらに、縞走査技術を適用したコンピュータ解析技術による高分解能な面外・面内変形計測が行われている^{6)~13)}。このようなスペックルグラム解析にもとづく干渉計測の縞走査技術は、時間的縞解析法と空間的縞解析法に大別できる¹⁴⁾。

本研究で用いる光学系は、従来の時間的縞解析技術において用いられていたマルチカメラ法^{15)~20)}に基づく光学系をスペックル干渉計測の性質を用いて改良²¹⁾²²⁾したものである。その結果、光学系のアライメント作業の軽減化がなされたとともに、バンドパスフィルターを用いることによって、容易にノイズの影響を回避している。同時に、連続する大変形計測を高分解能に実施可能としている。加えて、本研究では、本測定技術のさらなる高分解能化、測定精度の改善を目指して、測定時のスペックル径、キャリア信号周波数などの測定パラメータの設定条件を検討している。

これらの検討結果をもとに、本手法を電子デバイスの駆動時におけるパッケージの熱変形計測に適用している。

電子デバイスの変形計測では、デバイスを基板へ装着する際の、ハンダによる熱変形計測が数多く報告されている²³⁾²⁴⁾。さらに、ESPI を用いた MOS 型トランジスタ駆動時の熱変形計測も報告されている²⁵⁾。しかしながら、本来動的計測機能を付与されていない従来の ESPI による変形計測では、適切に動的計測が実施されていないのが実情である。

このような状況の下で、本研究では、従来のスペックル干渉技術では困難な大変形を持つ測定対象の高速かつ高分

解能な変形計測を可能とするマルチカメラ法(本研究に用いた光学系では、2 台のカメラのみを利用しているので、ここではデュアルカメラ法と呼ぶ。)に基づく新しい光学系²¹⁾²²⁾を用いて、演算増幅器(OP-アンプ)の駆動時に発生するパッケージの熱変形過程を計測している。

実験結果より、本計測技術が、連続する高分解能大変形解析を実施することができる計測法であることを示すとともに、電子デバイスが、ハンダによる基板装着時の熱変形にとどまらず、駆動時に常時熱ひずみによる変形を受けていることを明らかにした。

これらの結果は、本計測技術が、今後の電子デバイスにおけるストレスの緩和技術開発²⁶⁾につながるものであるとともに、スペックル干渉計測技術の新たな応用分野を開くものである。

2. デュアルカメラスペックル干渉計²¹⁾²²⁾

2.1 測定光学系

図 1(a)に示すように本研究において使用する光学系では、レーザー光源(波長 532nm, 出力 200mW)からのビームは、ハーフプリズム(HP-0)により照明光と参照光に分割され、照明光はスペシャルフィルターならびにハーフプリズムを通して測定対象に照射されている。ここで、測定対象の粗面より拡散した物体光は結像レンズによって二台のカメラ(カメラ-1, -2)上でそれぞれ測定対象像を結像する。この場合、結像レンズからの光は、HP-1 として示されているハーフプリズムによって二つに分割され、直進する光はさらにハーフプリズム(HP-2)によって角度を変え、カメラ 1 に結像する。

一方、ハーフプリズム(HP-1)によって分割されかつ方向を変えた光は、ハーフプリズム(HP-3)を経て、カメラ 2 に結像されている。この二つのカメラの撮像素子においては、時間的縞解析技術として従来行われていたように、対応す

* 原稿受付 平成 21 年 1 月 29 日

** 正 会 員 関西大学(大阪府吹田市山手町 3-3-35)

*** 学生会員 関西大学大学院(大阪府吹田市山手町 3-3-35)

† 関西大学大学院

†† 常光応用光学研究所(福岡県宗像市泉が丘 2-32-1)

Fig.1 Dual-camera optical system

る一つ一つのピクセルがそれぞれのカメラで位置合わせされている。

このような光学系を用いた縞解析技術は一般にマルチカメラ法¹⁵⁾と呼ばれている。ただし、従来の時間的縞解析技術でのマルチカメラ法では、少なくとも三台のカメラの各ピクセルの位置合わせが求められていた。これに対して、本研究で用いる光学系では、空間的縞解析技術を用いることによって二台のカメラ間の位置合わせのみによって光学系を構成することができる利点がある。また、従来のマルチカメラ法に基づく縞解析の光学系では、時間的縞解析技術によって縞解析処理が行われていたために、それぞれのカメラによって得られた画像の輝度分布も厳密に調整する必要があり、その光学系の設置は一般に困難をきたすものとなっていた。しかしながら、本研究で用いる縞解析技術は、空間的縞解析法に基づくものであるため、従来の手法のように厳密な輝度分布の調整は必要ではなく、キャリア縞を発生させることのできる各画素の位置合わせが二台のカメラ間で行なわれてさえいれば、容易に高分解能な縞解析を実現することができるものである。その意味において、ここで述べる手法は、従来法に比べて利点の多い光学系である²¹⁾²²⁾。

一方、図 1(a)のハーフプリズム (HP-0) によって分割された参照光は、空間フィルターならびにコリメーターレンズによって平行光とされ、下側よりハーフプリズム (HP-4) へ入射される。このハーフプリズムで分割され方向を変えられた光は、直角プリズム (P-2) で方向を変え、ハーフプリズム (HP-2) を直進して、カメラ 1 へ入射されている。また、ハーフプリズム (HP-4) を直進したビームは、直角プリズム (P-1) によって方向をさらに変え、ハーフプリズム (HP-3) に入射され、方向を変えた後にカメラ 2 に入射されている。

この場合、直角プリズム (P-1) は微小角 $\delta \theta$ 傾けられているので、参照光がハーフプリズム (HP-3) へ入射されるとき

Fig.2 Speckle patterns

Fig.3 Speckle patterns

には、波面は傾いている。したがって、この波面の傾きにに応じて、キャリア信号を創成することができる。さらに、各々のカメラの撮像素子上において、物体光と参照光との光路長が同じになるように光学系は設計されている。実際の光学配置を図 1(b) に示す。

この光学系を用いると、図 2 に示すように、平面の回転による面外変形前後で二台のカメラによって 4 枚のスペックルパターンを採取することができる。これらのスペックルパターンを用いて、(1) 式に示すような 2 枚のスペックルパターン (SP-1, SP-3) 間で減算の後に自乗する演算を行うとスペックルグラム SG を得ることができる。

$$SG = (SP-1 - SP-3)^2 \quad (1)$$

ここで、この演算を“ $\oplus$ ”であらわすことにすると、SP-1 $\oplus$ SP-2 では、図 3(a) 左図に示すようにキャリア縞を得ることができる。この縞をフーリエ変換するとスペックルグラムは周波数領域で図 3(a) 中図に示すようにキャリア縞のピークとして観察することができる。さらに、このピーク周辺の情報をバンドパスフィルターで処理すると、図 3(a) 右図に示すようにキャリア縞本来の成分を持った縞画像を得ることができる。同様に、SP-1 $\oplus$ SP-4 に基づく演算において、変形キャリア縞を得ることができる。いずれの場合にも、周波数領域でのフィルター処理を行うことによって必要とされる情報は周波数領域でピークを持つので、図 3 に示すように容易に S/N 比の高いフィルターリング処理された所要信号を抽出することができる。

図 2 に示した測定対象の変形前後のスペックルパターン

間で(1)式に示す演算を行うと、図 3(a)に示す SP-1 $\oplus$ SP-2 によって得られたスペックルグラムでは、光学系の直角プリズム(P-1)の微小角を制御することによって参照光の波面は回転され、これらの演算結果によってキャリア縞を発生させることができるとともに、その周波数を設定することができる。

以上のように、本光学系では、変形前後のスペックルパターンを記録し、かつ 2 台のカメラによって撮影された画像間の演算によって撮影を行うごとにキャリア縞を発生させることができるので、この光学系を用いると、変形状況を順次記録することによって、異なるカメラ間の変形前後のスペックルパターンを用い、変形キャリア縞を容易に得ることができる。この結果、いずれの変形過程においても、変形前後のスペックルパターン間だけで、空間的縞解析法に基づく縞走査解析¹²⁾¹³⁾を実現することができる。

このように時間的縞解析技術において利用されていたマルチカメラ技術による手法とキャリア信号を用いる空間的縞解析技術を融合すると、三台のカメラを用いなくても連続した変形解析を高分解能に実施することができる。

2.2 測定結果と検討

図 3 に示したバンドパスフィルタリング処理によって抽出されたキャリア縞、変形キャリア縞から空間的縞解析法¹²⁾によって得られた位相分布の差を演算することによって変形分布を求めたものが図 4 である。

図 4 に示す位相分布より本来の平面の回転角に相当する位相分布を減算した結果のばらつきとしての標準偏差を求めると、0.108rad(光学系がダブルパスであることから波長に対しては 1/116 波長に相当する)であった。

上記のように、マルチカメラ技術とキャリア信号を用いた空間的縞解析技術に基づく光学系²¹⁾²²⁾を用いると、変形前後のスペックルパターンを順次採取するだけで面外変形計測が高分解能に縞走査技術を用いて行うことができる。

2.3 連続する変形計測²¹⁾

本研究で用いる光学系では、図 5 に示すように、初期状態で二台のカメラによってまず(A-1)、(B-1)に示すスペックルパターンを採取する。ここで最初(第一)の変形が生じたものとし、(A-2)、(B-2)に示すスペックルパターンを続い

Fig. 4 phase map of out of plane deformation

Fig.5 Continuous processing

て採取し、引き続き変形が生じるとに画像を採取する。

このようにして、カメラ-1 では(A-1)から(A-20)まで、カメラ-2においても同様に、(B-1)から(B-20)までのスペックルパターンを連続して採取する。

この場合に生じる変形過程において、初期状態のスペックルパターン内のスペックルの形状は測定対象が変形するとともに変化し、面外変形が大きくなると、変形前後で対応するスペックルが空間的に重ならなくなる。このような状況になると、スペックル干渉計測では変形解析を行うことができなくなる。しかしながら、本研究で用いる光学系においては、次々と画像を採取し、順次変形する測定対象を比較的小さな変形に対する解析結果を積み重ねることによって、大変形に伴い直接的に解析が困難な状況にある大変形解析もそれぞれの微小変形解析結果を積み重ねることによって、実施することができる特徴を持っている。

本研究では、この光学系をダイナミック変形計測に適用し、本計測法の有効性を前報²¹⁾²²⁾までに示してきた。しかしながら、現状では、測定条件に依存して測定精度に変化が生じることが観察されている。本研究では、この原因を検討するとともに、本手法の最適な測定条件のあり方を次に議論する。

3. 光学系の測定条件

3.1 スペックル径の測定結果への影響

図 6 に変形測定時に設定するスペックル径の大きさを変化させた場合の測定結果への影響を示す。本研究では、二台のカメラのアライメント作業を容易に実施できるようにするために、できる限りスペックル径(S)と使用するカメラの受光素子のピクセルサイズ(P)との比(S/P 比)を大きく設定してきた。また、空間分解能を高めるために、カメラのピクセルサイズはできる限り小さな 2.2 μ m を利用してきた。この状況で、図 6 では、カメラのアライメントを考慮に入れたパラメータとして、ピクセルサイズとスペックル径との比(S/P 比)を横軸に設定している。S/P 比が大きくなるに従い、スペックル径は増大していることになる。

光源の強度との関係で、スペックル径を限りなく大きく設定することができないために、ここでは実験可能な範囲において、スペックル径と測定精度との関係を調べた。

図 6 に示すように、スペックル径が大きく(S/P 比が大きくなる)に従い、測定対象のばらつきが小さくなっている。このようなスペックル径の増大に伴う測定結果のばらつきへの影響の検証において、次のようなことが考えられる。

①2 台のカメラの位置決め誤差に起因する測定結果への

Fig.6 Relationship between measured results and the ratio of speckle diameter and pixel size

影響が、スペックル径の増大に従い緩和される方向に働く。

②その結果、縞画像の信号成分が増大し、ノイズ成分との比率(S/N比)を高く維持できるようになる。

③結果的に、キャリア縞、変形キャリア縞画像としてのスペックルグラムのコントラストが高くなる。

現実の問題として、スペックル径を小さく設定してスペックル径とピクセルサイズとの比を2.83とすると、キャリア縞そのものを画像全域で発生させることができなかった。このように、スペックル径を小さくすると2台のカメラ間のピクセルの位置合わせの問題が顕著に表れ、逆にスペックル径を大きく設定することによって、カメラの位置決め誤差にもとづく影響が緩和されている。2台のカメラの位置決め誤差は現状では、S/P比が2.83の場合に縞画像を得ることができなかった状況から約 $6.5\mu\text{m}$ ($2.83 \times 2.2 = 6.23\mu\text{m}$)以内に収まっているものと推定している。

現状では、スペックル径が大きくなることによって、スペックルとしての光学的な性質に基づき、ばらつきが小さくなる要因を明確に特定することができていない。現状の検証では、スペックル径を大きくすることによって、光学系のアライメント誤差が緩和され、測定の際のばらつきが抑制される現象のみをその理由として考えている。

3.2 キャリア縞周期の測定結果への影響

図7にキャリア縞の周期を変化させた場合の測定結果への影響を示す。ここでは、横軸をスペックル径とキャリア縞周期の比(Period of carrier fringe / Speckle diameter)としている。また、スペックル径は本実験では、レーザー出力強度との関係より最も大きく設定ができる $17\mu\text{m}$ とした。すなわち、図6に示すスペックル径とピクセル径との関係においてもっとも測定の際のばらつきを少なくすることのできるS/P=7.72の条件の下でキャリア縞周期のあり方を検討した。

図7において、キャリア縞の周期が小さくなる(周波数が高くなる)に従って、ばらつきは小さくなるものの、キャリア縞の周期が、スペックル径の2倍程度になったときに、もっとも測定結果のばらつきは小さくなり、さらに周期を短くすると、ばらつきは増大することが分かった。

この現象では、キャリア周波数が低くなり周期が長くなると図7(c)に示すように、スペックルグラム内の $1/f$ ノイズ領域の低い周波数領域に信号成分が存在することになる。この結果、縞画像そのもののS/N比は低下し、結果的に、

Fig.7 Relationship between ratio of period of carrier fringe to speckle diameter and measuring accuracy

ばらつきが増大しているのではないかと考えられる。

従って、キャリア縞の周波数を除々に高くシフトすると、図7(b)に示すように、 $1/f$ ノイズ領域から信号成分は離れ、縞画像のS/N比が改善され、測定結果のばらつきは小さくなるものと考えられる。

一方、キャリア周波数がさらに高くなるに従い、スペックルグラムとしての縞画像では、一般に、光学系の伝達関数に関係して、図7(a)に示すように、縞信号成分が小さくなる性質がある。この影響により明らかに、縞のコントラストが低下する。このような $1/f$ ノイズと光学系伝達関数などの関係から、キャリア周期がスペックル径の2倍近傍で測定精度に関する何らかのバランスが発生し、最もばらつきが小さくなるのではないかと考えている。この現象については、今後、詳細な検討が必要であると考えている。

本研究では、図6、図7に示した最も測定結果のばらつきが小さくなる条件のもとで、演算増幅器駆動時のパッケージの変形解析を以下に示すように実施した。

4. 演算増幅器の変形解析

本研究では、図8(a)に示すようにパッケージされた演算増幅器を対象として稼動(演算)時の面外変形を測定した。

図8(a)に示す演算増幅器の内部には、図8(b)に示すように樹脂を取り除くと8本の電極とその中心部に半導体回路が納められている。また、それぞれの電極は、図8(c)に示すような入・出力端子となっており、一つのパッケージに2つの回路が収まっている。本研究ではこの演算増幅回路の2番と3番の入力端子を用いて、反転増幅回路を図8(d)に示すように抵抗を基板上に配して作製し、その出力端に 500Ω の負荷を接続するとともに電流計を挿入した場合の駆動時のパッケージの面外変形を測定した。

Fig.8 Operational amplifier

Fig.9 Measured object

Fig.10 Out of plane of OP Amp

図 9 に測定対象の実験時の光学系の概略を示す。測定時には、測定面であるパッケージ上面を白くペイントして行った。

図 10 に示すように入力信号としてステップ入力を回路に印加し、その応答時のパッケージの面外変形過程を変形縞(スペックルグラム)として観察した。また、画像上で入力時刻を確定するために図 9 に示すように LED を測定対象の横に設置し、信号入力時刻を画像内に記録した。

LED による画像内での入力時刻の確定によって、図 10 に示すようにデジタルレコーダーによって記録された入力・出力信号と採取した画像とを同期させ、画像解析における変形過程と電気的な入出力状況との時間的な一致をはかっている。また、回路は反転増幅ではあるが、図 10 に示すように、変形過程と電気信号との間の観察を容易に行うために、出力をさらに反転させて記録した。

一秒間に七枚の画像を採取する条件で、シャッタースピードは $1/250\text{sec}$ として画像を採取した。図 10 に示すようにここでは、電気信号の記録開始後 0.5sec 少し手前で入力信号が印加され、出力信号が増幅率一倍で得られている。このときの出力信号電流は、対象とした演算増幅器のほぼ最大出力電流であった。

図 10 に示すように、入力が印加された直後の(a)に示す変形縞としてのスペックルグラムでは、変形が発生しているようには見えない。(c)に示す入力後 $3/7\text{sec}$ において、図 8(b)に示された半導体回路が収納されている素子の中心付近に、若干変化が現れ、さらに、(d)、(e)と変形が進む過程を観察することができた。そして、その縞変化が(f)に示すようにさらに広がる様子を観察することができた。

図 10(f)に示す入力印加後 $17/7\text{sec}$ における本手法に基づいて求めた変形キャリア縞を図 11(b)に示す。この変形キャリア縞画像をフーリエ変換を用いてフィルターリングした

(a) Deformed fringe (b) Deformed carrier fringe

Fig.11 Fringes (at $t=2.43\text{ sec}$)

結果を図 12(a)に示す。この変形キャリア縞から空間的縞解析法によって位相分布を求め、さらに、位相分布の基準となるキャリア縞の位相分布を減算した結果を図 12(b)に示す。中心付近に面外変形が発生していることを確認することができる。図 12(b)に示す変形量の最大値と最小値の差を求めると 150nm 程度であった。

同様に、面外変形過程の各時刻(図 10(a)-(f))における入力信号が ON になった時点をも 0sec として変形量をグラフにしたものが、図 13 である。入力信号印加後から $2/7\text{sec}$ 程度の時間遅れがあった後に、変形が二次遅れ系の応答のように進んでいる様子を確認することができる。最大変形量が約 150nm であることも確認することができる。

本研究で用いたカメラの特性により、 $1/7\text{sec}$ の画像間隔採取しか今回は行うことができなかったものの、より高速度に画像採取が可能なカメラを用いることによって、ダイナミックにかつ、より高速に変化する現象の解析も可能であるものと考えている。また、本研究では、 150nm の微小変形を高分解能に解析することができた。さらに、本研究で用いたデュアルカメラによるスペックル干渉計測システムでは図 5 に示すような大変形に対する解析過程を設定することによって、大変形解析も実施可能である。このような特徴を生かした分野における本測定法のさらなる応用を今後検討する予定である。

Fig. 12 Deformed phase map

Fig.13 deformation process

5. お わ り に

本研究では、マルチカメラ法による縞解析技術とキャリア縞を用いる空間的縞解析技術とを融合した新しいスペックル干渉計測法を用いて、演算増幅器の駆動時に発生する動的変形を測定した。さらに、このような光学系において問題となるスペックル径の設定条件、キャリア縞信号の周期の設定条件を検討し、測定結果におけるばらつきを抑えることのできる条件を提示した。また、その条件を用いた応用実験を実施した。

従来、電子デバイスとしてハンダにより基板への装着時に発生する変形が測定され、その歪についての議論がなされていた。しかしながら、現実には電子デバイスのパッケージは駆動時に入力信号の変化に伴い常時変形を受けていることを本研究では定量的に示した。

今後、電気回路基板における駆動時のパッケージの変形ならびに歪に関する検討を行うにあたって、本研究の成果は、本研究で用いた光学系の有用性を高めるものにとどまらず、提案する手法が電子基板・電子デバイスにおけるひずみ解析に利用可能な、有意義な計測技術であることも示した。

参 考 文 献

- 1) R. S. Sirohi: *Speckle Metrology*, (Marcel Dekker, New York, 1993) 99.
- 2) G. Cloud: *Optical Methods of Engineering Analysis*, (Cambridge University Press, New York, NY, 1995) 440.
- 3) B. J. Thompson: *Electronic Speckle Pattern Interferometry Principles and Practice*, (SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington, 1996) 1.
- 4) R. Jones and C. Wykes: General parameters for the design and optimization of electronic speckle pattern interferometers, *Optica Acta*, **28**,5(1981) 949.
- 5) A. Macovski, S. D. Ramsey, and L. F. Schaefer: Time-Lapse Interferometry and Contouring using Television System, *Appl. Opt.*, **10**,12(1971) 2722.
- 6) M. Sjodahl: Accuracy in electronic speckle photography, *Appl. Opt.*, **36**,13(1997)2875.
- 7) J. Kato, I. Yamaguchi and Q. Ping: Automatic deformation analysis by a TV speckle interferometer using a laser diode, *Appl. Opt.*, **32**,1(1993) 77.
- 8) P. Meinschmit, and K. D. Hinsch, R. S. Sirohi, and B. J. Thompson: Selected papers on Electronic speckle pattern interferometry principles and practice, SPIE Milestone Series Volume MS 132, SPIE optical engineering press Bellingham WA(1996)
- 9) K. Creath: Phase-shifting speckle interferometry, *Appl. Opt.*, **24**,18(1985) 3053.
- 10) D. W. Robinson and D.C. Williams: Digital phase stepping speckle interferometry, *Opt. Comm.*, **57**,1(1986) 26.
- 11) S. Nakadate and H. Saito: Fringe scanning speckle-pattern interferometry, *Appl. Opt.*, **24**,14(1985) 2172.
- 12) Y. Arai and S. Yokozeki: In-plane displacement measurement using electronic speckle pattern interferometry based on spatial fringe analysis method", *Opt. Eng.*, **43**,9(2004) 2168.
- 13) Y. Arai and S. Yokozeki: Improvement of measuring accuracy of spatial fringe analysis method using a Kalman filter and its application, *Opt. Eng.*, **40**,11 (2001) 2605.
- 14) M. Kujawinska: Spatial techniques of automatic fringe pattern analysis, SPIE, 1991 International Symposium on Optical Applied Science and Engineering, Short course-77 textbook (SPIE, 1991) 2.
- 15) O.Y. Kwon: Multichannel phase-shifted interferometer, *Opt. Lett.*, **9**,2(1984) 59.
- 16) O.Y. Kwon D. M. Shough, and R.A. Williams : Stroboscopic phase-shifting interferometry, *Opt. Lett.*, **12**,11(1987) 855.
- 17) Kjell j. Gasvik: *Optical metrology* 2nd ED, (John & Sons, New York, NY 1995), 260.
- 18) R. Smythe and R. Moore: Instantaneous phase measuring interferometry, *Optical Engineering* **23**,4(1984) 361.
- 19) L. Mertz: "Complex interferometry, *Appl. Opt.* **22**,10(1983) 1530.
- 20) A.J.P. van Haasteren and H. J. Frankena: Real-time displacement measurement using a multicamera phase-stepping speckle interferometer, *Appl. Opt.*, **33**,19(1994) 4137.
- 21) Y. Arai, H. Hirai and S. Yokozeki: Electronic speckle pattern interferometry based on spatial fringe analysis method using two cameras, *J. Mod. Opt.*, **55**,2 (2008) 281.
- 22) Y. Arai, H. Hirai and S. Yokozeki: High-resolution dynamic measurement using electronic speckle pattern interferometry based on multi-camera technology, *Optics and Lasers in Engineering* **46**,10(2008) 733.
- 23) B. W. Lee, W. Jang, D.W. Kim, J.H. Jeong, J. W. Nah, K. W. Paik, and D. Kwon: Application of electronic speckle-pattern interferometry to measure in-plane thermal displacement in flip-chip packages, *Materials science and Engineering A* **380**(2004) 231.
- 24) S. Dilhaire, S. Jorez, A. Cornet, E. Schaub and W. Claeys: Optical method for the measurement of the thermomechanical behavior of electronic devices, *Microelectronics Reliability* **39**,6-7(1999) 981.
- 25) K. Nassim, L. Joannes, A. Cornet, S. Dilhaire, E. Schaub, and W. Claeys: High-resolution interferometry and electronic speckle pattern interferometry applied to the thermomechanical study of a MOS power transistor, *Microelectronics Journal* **30**,11(1999) 1125.