

## テラヘルツ波を用いたイオンマイグレーションの検出

石川 義博\*, 水戸部 一孝\*<sup>1</sup>, 鈴木 雅史\*, 吉村 昇\*

(2009年3月19日受付; 2009年5月19日受理)

## Detection of Ion Migration that Uses Terahertz Wave

Yoshihiro ISHIKAWA,\* Kazutaka MITOBE,\*<sup>1</sup> Masafumi SUZUKI\* and Noboru YOSHIMURA\*

(Received March 19, 2009; Accepted May 19, 2009)

The detection of ion migration generated in Printed Wiring Board (PWB) was analyzed by using the terahertz (THz) imaging techniques. THz wave can transmit polymeric resin but it cannot transmit in metal. We have used this characteristic of THz wave in order to detect the dendrite in PWB. The validity of the THz imaging was compared with Multi soft X-ray TV inspection apparatus and microscopic images. As a result, the spatial resolution of THz imaging is not high compared with X-ray images, but it is possible to find the dendrite by THz transmission imaging. Again, we have calculated the copper density from comparing the measured data of X-ray images and THz transmission image of dendrite. It is clear that the least density of detectable copper was about 17.8  $\mu\text{g}/\text{mm}^2$  by our THz imaging system.

## 1. はじめに

近年、電子回路の集積化・小型化に伴い、配線間の絶縁距離が短縮され、イオンマイグレーションによるプリント配線板 (printed-wiring board : PWB) の絶縁信頼性の低下が問題となっている。イオンマイグレーションが初めて顕在化するものは多くの場合フィールドからのクレームによるものだが、故障時の現象は完全に絶縁破壊を起こすまでには至らず、絶縁抵抗の減少によるシステムの動作不良の場合が多い<sup>1)</sup>。イオンマイグレーションも絶縁材料やコートされた部品の内部で発生するため、外部からの確認は容易ではなく、故障の原因がイオンマイグレーションであったと確認されることは非常に少ない<sup>1)</sup>。

イオンマイグレーションの評価方法には外観や形状を観察する光学顕微鏡観察、X線顕微鏡観察、原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope : AFM) や、析出物の元素組織を評価する X線光電子分光法 (X-ray Photoelectron Spectroscopy : XPS)、オージェ電子分光法 (Auger Electron Spectroscopy : AES) などの方法があるが、多層基板の層間に伸展するデンドライト等の内部情報が得られるものは X線顕微鏡または放射化学

分析等であり、前者はヒトに有害であり測定対象にもダメージを与え、後者は特殊な設備を使用する必要がある<sup>1)</sup>。

テラヘルツ (THz : 1THz=10<sup>12</sup>Hz) 帯の電磁波 (以後、テラヘルツ波と呼ぶ) は、その発生や検出が困難であり良質な光源や検出器が存在しなかったことから、“未開拓領域の電磁波”と呼ばれていた。しかし、近年ではテラヘルツ波の発振や検出手法の改善により比較的容易に扱える技術基盤が整い、テラヘルツ領域での研究が盛んになってきた。特にテラヘルツ帯域の特徴を活かした分光やイメージングへの応用に関する研究は世界的にも盛んであり、X線に代わる新たな非破壊検査技術として大きな期待がもたれている<sup>2)</sup>。例として、テラヘルツ波が生体構成分子や水による吸収が大きい特徴を利用して、空港での危険物の検査<sup>3,4)</sup>や壁画の解析<sup>5)</sup>、断熱材などの欠陥解析<sup>6)</sup>、癌の検査<sup>7,8)</sup>、植物の葉の水分分布<sup>9)</sup>といった様々な応用方法が提案されている。

本論文では、PWB内部に発生するイオンマイグレーションを検知するための基礎研究として、テラヘルツ波が高分子樹脂を透過しやすく金属を透過しないという特性を生かし、プリント基板の層間に伸展するデンドライト (dendrite) を検出できる可能性を検証した。

**キーワード** : イオンマイグレーション, デンドライト, テラヘルツ波, X線透過画像, イメージング

\* 秋田大学工学資源学部電気電子工学科 (010-8502 秋田市手形学園町 1-1)

Dept. of EEE/ Faculty of Engineering Resource Science / AKITA UNIV, 1-1, Tegata Gakuencho, AKITA 010-8502, Japan

<sup>1</sup> mitobe@ipc.akita-u.ac.jp

## 2. 試験用基板試料作製手順

本論文では多層基板の層間に伸展するデンドライトをテラヘルツ波により可視化できるかを調べるために、フレキシブル基板を重ねることで多層基板を模擬した試験基板を作製し、層間において WDT (water drop test) 法によりイオン

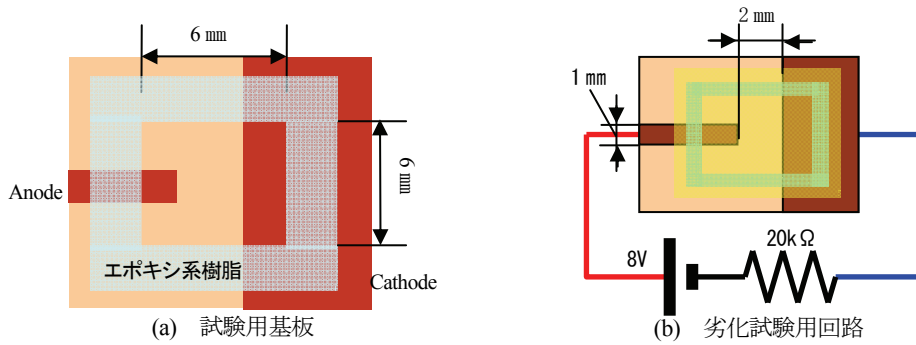


図1 加速試験用回路と絶縁劣化用試験基板  
 Fig. 1 Circuit for acceleration test and examination basal lamina of neural tube for insulation deterioration.

マイグレーションを発生させた。WDT 法は脱イオン水滴下法と呼ばれ、電極および絶縁部分を脱イオン水で覆うため、湿度が 100%の結露した状態を模擬することができ、電極金属の溶出、移行が加速され短時間でイオンマイグレーションを発生させることができる。イオンマイグレーション現象は進行過程において水酸化銅が析出するため、デンドライトと水酸化銅を発生させた絶縁劣化サンプルをそれぞれ作製した。試験用基板の作製手順は下記の通りである。試験基板に脱イオン水を滴下し、水滴の上にフレキシブル基板（電極のないポリイミド部分：縦横 8 mm × 8 mm、以後、カバーフィルムと呼ぶ）を設置する。カバーフィルムは水滴の表面張力により試験基板上に固定され、フレキシブル基板とカバーフィルムの層間が脱イオン水で満たされた状態で試験基板に直流電圧を印加し、イオンマイグレーションを発生させた。フレキシブル基板の電極部の銅の厚さは約 9 μm である。図 1(a)に試験基板の形状を示す。電極の形状は、アノード側が幅 1 mm の凸型電極、カソード側が平板電極である。電極形状は、電界を集中させることでデンドライトの発生箇所を制限できること、エッチングによる加工精度を考慮して決定された。ここでは、本装置で使用しているテラヘルツ波の理論的空間分解能が約 2 mm であることから、電極間隔を 2 mm とした。なお、本装置ではテラヘルツ波を内径 1 mm のアパーチャを通すことで近接場効果により、0.3 mm の空間分解能を得ている<sup>9)</sup>。また、通常 WDT 法では、ピペット等を用いて基板に定量した水滴を滴下しているが、電極と水滴の接触面積が異なると試験開始時の電極間抵抗値（初期抵抗）に大きなズレが生じる。そこで本論文では、エポキシ系樹脂を用いて図 1(a)に示す枠を作製し、試験基板と水滴の接触面積（6 mm × 6 mm）を一定にすることで試行ごとの電極間抵抗値の初期値の差を抑制した。図 1(b)にイオンマイグレーションを発生させるための回路を示す。試験基板の電極には、電圧 8 V の定電圧直流電源（KENWOOD REGULATED DC POWER SUPPLY PR36-1.2A）、20 kΩ の保護抵抗を接続した。電圧印

加時間は 30 分、脱イオン水の滴下量を 50 μL と設定しデンドライトを発生させた。電圧印加中の絶縁劣化用試験基板の外観を図 1(c)に示す。印加後は層間の水分が完全に蒸発するまで乾燥させ、これをテラヘルツイメージングに用いる劣化サンプルとした。また、試験基板に印加する電圧の極性を反転させること（極性効果）により、デンドライトの発生量を抑え、水酸化銅の発生量を増やすことができ、このようにして絶縁劣化させた基板を水酸化銅サンプルとして利用した。

3. テラヘルツイメージング

3.1 実験装置

本研究で使用しているテラヘルツイメージングシステム（TIS-200G テラヘルツ研究所）の構成を図 2 に示す。イメージングシステムはファンクションジェネレータ（DF1905 Digital Function Generator）により直流電源（KX-100H DC Power Supply）を繰り返し周波数 4 kHz で ON/OFF しており、この直流電源で 0.189 THz のテラヘルツ波を連続波として発振させることができる TUNNET (tunnel injection transit diode) ダイオードを駆動している。放射されたテラヘルツ波は、テフロン製レンズを通過し、口径 1.0 mm のアパーチャを介して測定用サンプルに入射する。サンプルを透過したテラヘルツ波は、ショットキーバリアダイオード (Schottky barrier diode : SBD) で検出され、ファンクションジェネレータからの参照信号を基にロックインアンプ（SR810 DSP Lock-in

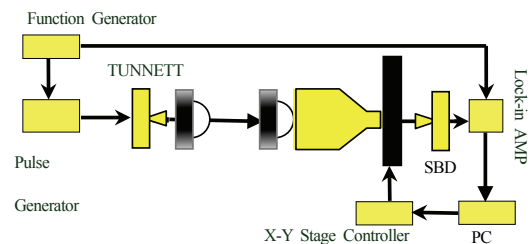


図2 テラヘルツイメージングシステムのブロック図  
 Fig. 2 Block diagram of terahertz imaging system.

Amplifier) で同期検波される。ロックインアンプは PC に接続されており、サンプルをラスタースキャンする X-Z ステージの位置情報を基に検出された信号成分が画像化される。また、テラヘルツ波による透過画像の妥当性を評価するために、軟 X 線顕微鏡 (SFX-80, ソフテックス(株)) による X 線透過画像と、光学顕微鏡 (IMT-2, OLYMPUS) による光学顕微鏡写真とを比較した。

### 3.2 各種イメージング条件および方法

フレキシブル基板をエッチングしたときに生じる銅電極からの溶出とイオンマイグレーション発生過程における銅電極からの溶出とを区別するため、事前に軟 X 線顕微鏡と光学顕微鏡により全ての試験用基板の透過画像を撮影した。次に WDT 法を用いてイオンマイグレーションを発生させ、劣化終了後に加えた水滴が完全に乾くまでサンプルを空气中で自然乾燥させた。透過画像の撮影は、はじめにテラヘルツイメージングシステムを用いてテラヘルツ透過画像を計測し、その後、光学顕微鏡写真および軟 X 線顕微鏡写真を撮影する。各装置の設定値は下記の通りである。

- ・テラヘルツ透過画像の計測条件

周波数: 0.189 THz    ピッチ: 50  $\mu\text{m}$   
 時定数: 3 ms    スキャンインターバル: 0.015 s  
 ロックインアンプ感度: 500  $\mu\text{V/pA}$   
 走査範囲: 5,000  $\times$  5,000 [ $\mu\text{m}$ ]

- ・軟 X 線顕微鏡の計測条件

イオンマイグレーションの場合  
 管電圧: 32 kV    管電流: 87  $\mu\text{A}$   
 ゲイン: 25.28    オフセット: 28.02  
 倍率: 40[倍]

水酸化銅の場合  
 管電圧: 32 kV    管電流: 86  $\mu\text{A}$   
 ゲイン: 21.71    オフセット: 29.67  
 倍率: 40.3[倍]

- ・光学顕微鏡の計測条件

倍率: 40[倍]  
 照射条件: 透過光

### 3.3 各種透過画像の比較

イオンマイグレーション前 (未劣化), イオンマイグレーション後 (劣化) および水酸化銅サンプルの一例を示す。

図 3(a) に未劣化サンプルの X 線透過画像, 同図(b) に光学顕微鏡写真, 同図(c) にテラヘルツイメージを示す。図 3(a) および同図(b) に見られる電極端の凹凸は, エッチング時の銅の溶

出によるものである。テラヘルツイメージでは電極境界部分で回折が生じており, また空間分解能が約 0.3 mm 程度と低いことから, 光学顕微鏡写真, X 線透過画像のような精細な電極形状の情報を得ることができない。しかしながら, 電極と非電極部分の識別は十分に可能なことがわかる。

図 4(a) に劣化サンプルの X 線透過画像, 同図(b) に光学顕微鏡写真, 同図(c) にテラヘルツイメージを示す。電圧印加前後の X 線透過画像 (図 3(a), 図 4(a)) を比較すると, イオンマイグレーションによるアノード電極から銅が溶出している様子を確認できる。図 4(a) では電極が欠けたように見えるが, 光学顕微鏡写真 (図 4(b)) と比較すると, 銅が溶出することにより電極先端部分が薄くなっていることを確認できる。また, 光学顕微鏡ではデンドライトが一樣に同じコントラストで写っているが, X 線透過画像ではそのコントラストに差が有ることを確認でき, デンドライトの厚さが部位によって異なることがわかる。テラヘルツ透過画像 (図 4(c)) には, 電極と電極間の左右 2 カ所にデンドライトの塊が高いコントラストで描画されている。電極部分は X 線透過画像と類似しており, テラヘルツ波を用いることで, ある程度電極金属の溶出を検出できることがわかる。電極間に非透過部分が新たに生じたことや, デンドライト部分は銅金属であるためテラヘルツ波が透過しないことを考慮すると, 本実験で得られたテラヘルツ透過画像は妥当であり, デンドライトを検出可能であると考える。

図 5(a) に水酸化銅サンプルの X 線透過画像, 同図(b) に光学顕微鏡写真, 同図(c) にテラヘルツイメージを示す。水酸化銅発生前後の X 線透過画像 (図 3(a), 図 5(a)) を比較すると電極に大きな変化は見られない。また, 光学顕微鏡写真では水酸化銅のはっきりと確認できるが, X 線透過画像 (図 5(a)) ではうっすらと, テラヘルツイメージ (図 5(c)) ではまったく確認できない。これは 0.189 THz では水酸基による吸収が少ないことが原因と考える。

MATLAB を用い, 得られたテラヘルツイメージからの電極間の領域を切り出すために, 平板電極側下端 (図面下方) から凸型電極側 (図面上方) へ, 透過量 (SBD の電圧値) を比較していき,  $10^4$  V を超えた位置を求めた。この位置を平板電極と電極間領域の境界とした。さらに, この位置から凸型電極側 (図面上方) へ 2 mm の領域 (2 mm  $\times$  5 mm) を求め, この電極間範囲で電極を除外して  $1.5 \times 10^4$  V 以下の値 (デンドライトによる吸収による減衰値) を示す総ピクセル数を計算した。この処理を 10 個のサンプルに対して実施し, テラヘルツ光の透過量が減少したピクセル数の平均値と標準偏差を求めた。図 6 にイオンマイグレーション発生前後における電極間を透過するテラヘルツ光が減少したピクセル数 (以後, 析出ピクセル数と呼ぶ) を示す。イオンマイグレーション後

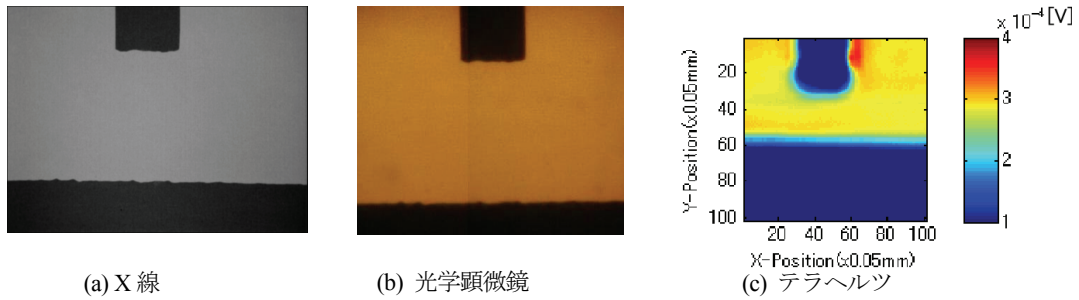


図3 未劣化サンプルの各種透過画像  
Fig. 3 Various transmission images of undegradation sample

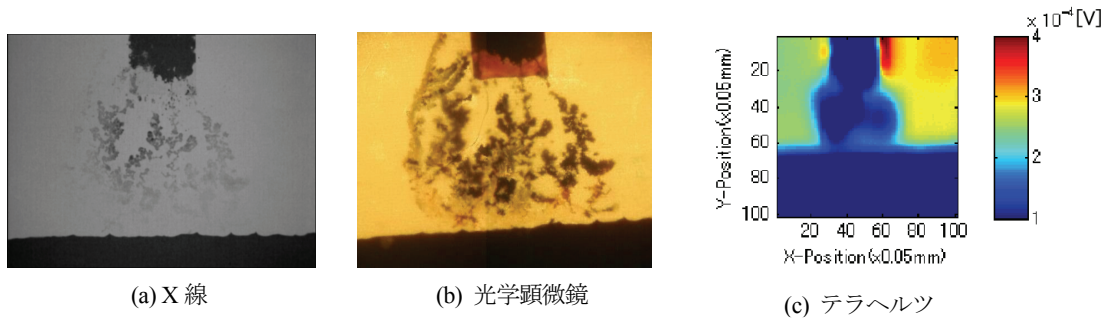


図4 絶縁劣化後サンプルの各種透過画像  
Fig. 4 Various transmission images of sample after insulation deterioration.

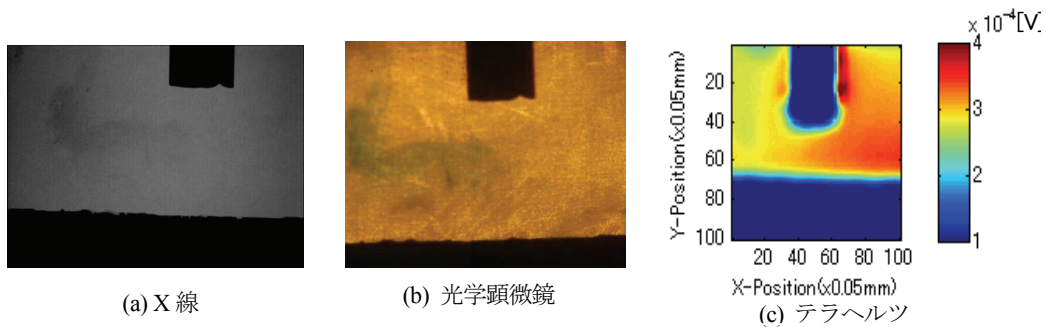


図5 水酸化銅析出サンプルの各種透過画像  
Fig. 5 Various transmission images of copper hydroxide deposition sample.

に析出ピクセル数が増加しており、独立二群の二標本  $t$  検定により検定した結果、劣化サンプルと未劣化サンプルには析出量に差が見られ、危険率  $p < 0.01$  の統計的有意差を確認した。

これらの結果から、テラヘルツ波イメージングによりイオンマイグレーションを検知可能であり、銅イオンの溶出によるアノード電極の形状変化も僅かに捉えられることを確認できた。

4. X線透過画像による銅の密度分布の評価

4.1 実験方法

一般に、銅金属の質量に比例してX線透過量(透過輝度)は減少する。本章では、既知の厚みを持つ銅箔を利用して軟X線透過輝度と銅質量との関係式を求めることで、還元された銅金属の粒塊であるデンドライトの微小面積(ピクセル)

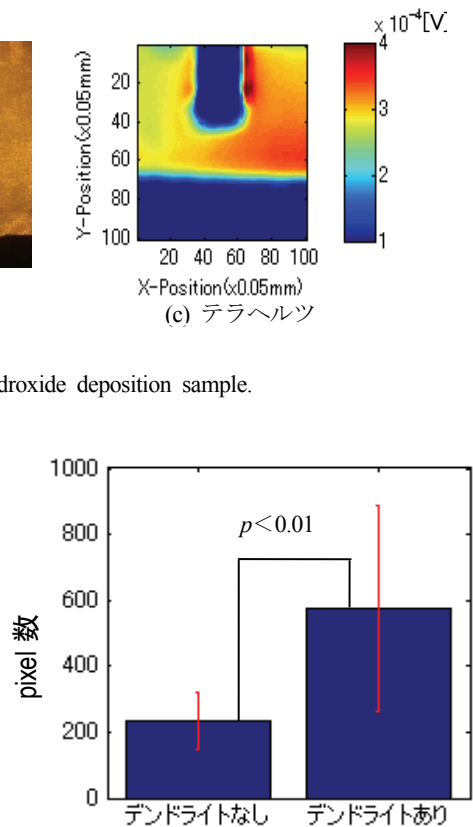


図6 テラヘルツ透過画像における析出ピクセル数の差  
Fig. 6 Differences of number of deposition pixels in terahertz transmission image.

あたりの銅金属の質量、つまり銅としての密度分布を求めることができると考えた。軟X線透過輝度と銅質量との関係式

を求める実験には、厚さ 2  $\mu\text{m}$ 、純度 99.8%の銅箔を用いた。この銅箔を 2 枚のポリイミド中に配置し、X 線透過画像の平均輝度と輝度の標準偏差を測定した。銅箔の厚さ 2  $\mu\text{m}$ 、4  $\mu\text{m}$ 、6  $\mu\text{m}$ 、8  $\mu\text{m}$  について測定し、1 ピクセル、高さ 1  $\mu\text{m}$  あたりに含まれる銅の質量を計算により求め、輝度に対する銅密度の変化をグラフ化した。最小二乗法により輝度と析出量の変化を示す近似直線を求め、電極間に析出した dendrite の銅密度イメージを作製し比較した。

試験は再現性、妥当性を高めるためイオンマイグレーション前後のサンプルをそれぞれ 10 個ずつ使用した。

4.2 結果および考察

図 7 に任意の厚さの銅箔から算出した銅密度と軟 X 線透過輝度の関係を示す。銅密度と軟 X 線透過輝度の変化は線形性を示し、銅密度に比例して輝度が減少することを確認できる。近似式より図 3(a)、図 4(a) の X 線透過画像を銅密度分布のグラフに変換したものを図 8 に示す。図 3(a) と図 8(a) を比較すると、X 線透過画像ではわかりにくかった X 線の照射範囲による輝度の差を確認できる。図 4(a) と図 8(b) を比較するとアノード電極付近に dendrite が多く蓄積することを確認できる。過去の論文においてアノード電極側に多くの堆積物が得られることが明らかになっているが、この現象は反応式の関係から堆積物は水酸化銅であると考えられていた<sup>10-12)</sup>。しかし、今回の測定において微量の水酸化銅は X 線が完全に透過してしまい検出できなかったことから、図 4(a)、図 8(b) に明るく表示されている部分は dendrite であると考えざるを得ない。この場合、カソードで銅イオンが還元され蓄積されていく過程とは反する結果を示すものになる。これは進展した dendrite カソード電極の役割をするため dendrite 先端で銅イオンが還元されやすく、アノードに近い dendrite 先端部に多く蓄積したのではないかと考えた。図 8(b) を図 4(c) と比較すると、テラヘルツイメージで非透過となった領域が軟 X 線で銅密度の高いとされた領域を含んでいることがわかる。一方、図 8(b) からは判別しづらいが、テラヘルツイメージで透過となった領域にも微量の銅が分布していた。このことから、析出した dendrite が全てテラヘルツイメージに反映されているわけではなく、銅密度分布画像から約 1 ng/pixel (17.8  $\mu\text{g}/\text{mm}^2$ ) 以上の銅密度がある場合、テラヘルツイメージに高いコントラストで現れると見積もられた。

軟 X 線画像には観察野周辺部に照射光量不足による照射ムラが発生していた。そこで、軟 X 線顕微鏡の照射ムラの影響を排除するために画像の両サイドの 100 列を削除し、中央部分のみを対象として dendrite の析出面積を求めた。未劣化および劣化の全銅密度分布画像を対象に、 $0 < x \leq 2$  ng/pixel ( $0 < x \leq 35.6 \mu\text{g}/\text{mm}^2$ ) の閾値を設定し、画像内の総ピクセル数の平均と標準偏差を示したグラフを図 9 に示す。イ

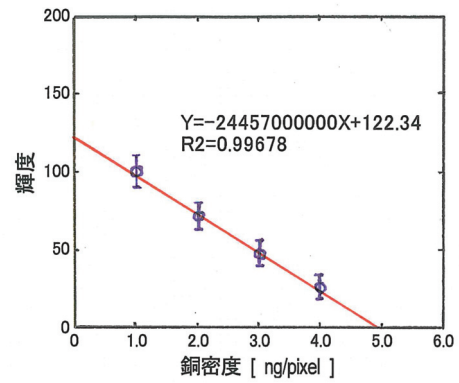
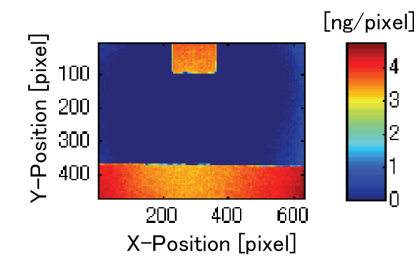
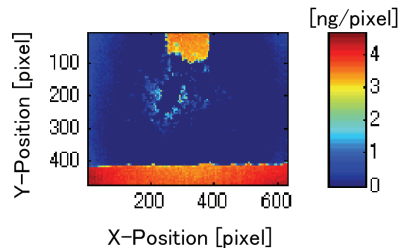


図 7 銅の密度と透過輝度の関係  
Fig. 7 Density of copper and dealings of penetration luminance.



(a) 劣化前の銅の密度分布



(b) 劣化後の銅密度分布

図 8 銅の密度分布画像  
Fig. 8 Density distribution image of copper.

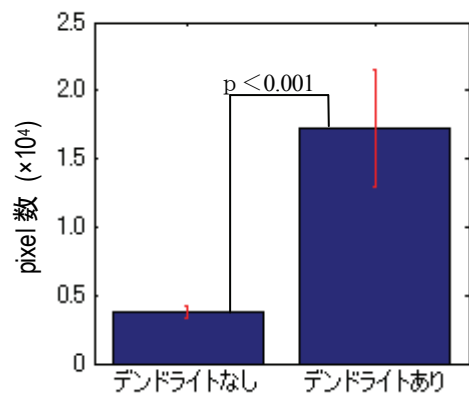


図 9 銅の密度分布画像における析出ピクセル数の差  
Fig. 9 Differences of number of deposition pixels in density distribution image of copper.

オンマイグレーションの前後で銅密度が増加した領域を検出することで、電極間に蓄積した dendrite の析出面積を定量することを可能にした。なお、標準偏差は試行ごとの析出面積の変動を示しており、dendrite なしにおける標準偏差は本手法におけるノイズを示す。軟 X 線顕微鏡はテラヘルツ透過画像と比べて空間分解能が高いため、マイグレーション前後における析出面積の有意差も大きく得られていることがわかる ( $p < 0.001$ )。一方、図 9 と図 6 が同様の傾向を示していることから、テラヘルツ透過画像で定量された dendrite の析出面積の計測結果の妥当性を確認できる。

## 5. おわりに

本研究ではイオンマイグレーション現象の非破壊検査へのテラヘルツイメージング技術の応用を目的とし、検出可能な条件を検討した。その結果、以下の知見が得られた。

電極間隔 2 mm の積層されたフレキシブル基板の層間に WDT 法により発生させた dendrite の有無をテラヘルツイメージングで検知できることを確認し、空間分解能は劣るがテラヘルツ透過画像が軟 X 線により定量した銅密度分布画像に近いことを明らかにした。また、銅密度分布画像から、アノードに近い dendrite 先端部により多くの銅金属が蓄積する現象を明らかにした。同時に、軟 X 線顕微鏡により定量した dendrite の銅密度分布画像と比較することで、今回の試験条件では、銅の最小密度が約  $17.8 \mu\text{g}/\text{mm}^2$  以上存在すればテラヘルツにより検知できることを確認した。

一般に、テラヘルツ帯の電磁波は樹脂材料を透過しやすく、金属材料で反射するため、テラヘルツ透過・反射イメージングにより積層プリント配線板の内部に発生するイオンマイグ

レーションの簡易検査も可能になると期待できる。また、X 線は人体への被曝のため遮蔽された環境でなければ利用できないが、テラヘルツ帯での電磁波は人体に無害であるため、使用場所に制約がないとのメリットもある。一方、テラヘルツイメージング技術の活用には、今後、テラヘルツ波発振器の出力向上と共に空間分解能向上の技術開発が不可欠と考える。

## 参考文献

- 1) 電気学会・イオンマイグレーションの発生特性と防止調査専門委員会: プリント基板の試験と評価—イオンマイグレーション現象とその対策—, p.31, オーム社(2007)
- 2) 山下正嗣 中島佐知子 大谷知行 川瀬晃道: 電子情報通信学会誌, **89** (2006) 481
- 3) K. Kawase, Y. Ogawa and Y. Watanabe: IEICE Trans. Electron., **E87-C** (2004) 1186
- 4) J.F. Federici, B. Schulkin, F. Huang, D. Gary, R. Barat, F. Oliveira and D. Zimdars: Semicond. Sci. Technol., **20** (2005) S266
- 5) J.B. Jackson, M. Mourou, J.F. Whitaker, I.N. Duling, S.L. Williamson, M. Menu and G.A. Mourou: Opt. Commun., **281** (2008) 527
- 6) J.D. Roth, P.J. Seebo and P.W. Winfree: Mater. Eval., **66** (2008) 325
- 7) P.V. Wallace, E. Macpherson, J.A. Fitzgerald, L.O. Thomas (TeraView Ltd, Cambridge, GBR), E. Provenzano and S. Pinder: Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng., **6386** (2006) 638610.1
- 8) P.V. Wallace: Laser Focus World, **42**, 6 (2006) 83
- 9) H.B. Zhang, K. Mitobe and N. Yoshimura: JJAP, **47** (2008) 8065
- 10) 水戸部一孝, 吉村 昇: 静電気学会誌, **23** (1999) 272
- 11) 唐 超, 水戸部一孝, 吉村 昇: 電気学会論文誌, **123** (2003) 932
- 12) 水戸部一孝, 吉村 昇: 電気学会論文誌, **127** (2007) 335