高アスペクト比スルーホール内壁の欠陥検査装置*

原 靖彦** 沼田 清*** 品田 聡† 井上隆一† 岩田弘志††

System for Inspecting Defects on the Inner Wall of High-aspect-ratio Through-holes in Printed Circuit Boards

Yasuhiko HARA, Kiyoshi NUMATA, Satoru SHINADA, Ryuichi INOUE and Hiroshi IWATA

This paper describes a system that inspects the inner wall of plated through-holes in high-density printed circuit boards. These through-holes sometimes contain "void defects", in which part of the copper plating is missing. These voids are detected by means of fluorescence emissions from the base material of the P.C.Bs. The paper describes an optical system for illuminating the inside of a through-holes, and for detecting fluorescence emitted from the void. This system can detect voids as small as $\phi 150 \mu\text{m}$ on the wall of a through-hole of diameter of 0.24 mm at depth of up to 3.5 mm.

Key words: inspection, defect, through-hole, fluorescence, void, printed circuit board

1. はじめに

本研究は高密度多層プリント配線板の品質を保証するための検査技術に関するものである。高密度多層プリント配線板は、0.1 mm 程度の厚さの絶縁板（ガラスポリイミドなど）の上に銅箔製の配線回路を形成したものを多数枚積層したものである（図1）。各層の電気導通をとるためにスルーホールが使われる。スルーホールは内壁を銅めっきした穴であり、必要に応じて各層の銅配線と接続している。本研究が対象とする配線基板は、板厚約7 mm、スルーホールの径 $\phi 0.24 \text{ mm}$ である。スルーホールが高いアスペクト比（穴の深さ/穴径）を持つので、穴内壁の銅めっきがまれに正常に形成されない場合がある。銅が欠損した欠陥をスルーホールボイドと呼ぶ。ボイドは電気的な断線の原因となるので、あってはならない欠陥である。プリント配線板製作後にスルーホール両端の電気導通試験が行われるが、電気導通試験では完全に断線した欠陥しか検出できない。部分的に銅が接続しているスルーホールは長時間の使用後、断線する恐れがあるので、他の手段で検査を行う必要がある。スルーホールは深い穴であるので通常的手段では検査が困難であるが、これを実現しようとするのが、本研究の第一の目的である。また、スルーホールの詰まりの検出法、および内壁の状態を観察できる手段を開発し、スルーホールの総合的な検査技術を提供することを目的とする。

ボイドの検査法として次のような方法が報告されている：スルーホールの入り口にふたをして、配線基板周囲を強く照明する。照明光は配線基板内部に伝搬する。もしボイドがあると、照明光はボイド部分を通してスルーホール内部に漏れる。従ってスルーホールを他の口から観測すると通常は暗いスルーホールが光って見えるのでボイドを検出することができる¹⁾。この方法は、配線板の回路内部構造によっては照明光の伝搬が妨げられるので、照明光がボイド部分まで到達し難いことがある。このとき、ボイドの検出性能が低下する。また、照明光が直接

スルーホールに入らないようにするために、スルーホール入口のふたは完全である必要がある。これは実用化を図るうえで困難な要素となる。また、この方式では強い照明光が配線基板を通して反対側に突き抜けるので、これを遮光して微弱な漏れ光だけを検出する必要がある。これは検出信号を高いSN比で得る上で不利な要素となる。検出欠陥は幅 $100 \mu\text{m}$ 程度の環状ボイドと報告されている。

これらの困難に対処するために、これまでにボイド部から発生する蛍光を利用して、ボイドを検出する方法が開発された²⁾。ここで報告する内容はこの方法をよりアスペクト比の大きいスルーホールに対して適用できるように改良したものである。開発した方法はアスペクト比約30（従来約10）の高いアスペクト比のスルーホールにおいて幅 $20 \mu\text{m}$ 程度の微細な環状ボイドを検出することを目的としている。

内壁の観察手法としては、 $\phi 0.19 \text{ mm}$ の極細径ファイバースコープを開発した。

2. 検査方法

2.1 検出原理

図1には検出の原理が示されている。スルーホールの入口に

Fig. 1 Illumination of a through-hole and emission of fluorescent light from a void

* 原稿受付 平成6年4月4日

** 正会員 (株)日立製作所生産技術研究所 (横浜市戸塚区吉田町292)

*** (株)日立製作所汎用コンピュータ事業部 (秦野市堀山下1)

† 正会員 (株)日立画像情報システム (横浜市戸塚区吉田町292)

†† 日立コンピュータエンジニアリング(株) (秦野市堀山下1)

Fig. 2 Optical system for void detection

照明光（蛍光励起光）を入射する。照明光はスルーホールの壁面で反射しつつ奥に進んで行く。もしボイドがあると、照明光は基材部から蛍光を励起する。蛍光は等方的に放出されるが、スルーホールの壁面を反射しつつ、一部はスルーホールの入口から外部に放出される。この蛍光の有無をスルーホールごとに判定すれば、ボイドの検査を行うことができる。なお、これから図1に示すように基板表面をXY平面に、スルーホールの奥行き方向をZ軸に座標をとるものとする。

発生する蛍光の特性は基材の種類により異なるが、文献3)に示されているように黄色から赤色の比較的大きな波長帯域で発生する。本方法では発生する蛍光の量は微弱である。しかもアスペクト比の大きなスルーホール内部を伝わって外部に放出され、かつ検出される蛍光量はさらに微弱なものとなる。従って検出器として超高感度の検出器が必要になる。本研究ではさらにボイドの検出感度を上げるために、従来の水銀ランプ光に代えて、光源として指向性が強く、かつ照明密度が高いレーザー光を利用することを試みた⁴⁾。

2.2 検出光学系

図2に検出光学系を示す。照明光として波長514nmの空冷Arレーザーを用いた。レーザー光はビームスプリッターBM1により光路Aと光路Bに分割される。おのおのの光路A,BはビームエクパンダEXAおよびEXBにより広げられる。次に集光レンズLAおよびLBを通る。光路A,Bの光は次にビームスプリッターBM2により合体される。レンズLA, LBは異なった焦点距離を持つので、レーザー光はおのおのFA1およびFB1に集光する。この後、2つの光路の光はダイクロイックミラーDMに入射し、反射されて対物レンズ

OL（倍率10×、開口数0.25）を通過してFA2およびFB2に集光する。このように2つの光路A,Bを用いた理由は後ほど説明する。ボイドがあった場合にはボイドから発生した蛍光は対物レンズを逆に通ってダイクロイックミラーDMおよびバリアフィルタBFを通過して検出器DTにより検出される。ダイクロイックミラーDMおよびバリアフィルタBFは590nm以上の赤色蛍光が通過するような特性のものを選んだ。この波長特性を選んだ理由は、試行錯誤的に、検出信号のSN比が良くなるように条件を選んだ結果である。ボイドを検出した例は図5に示す。なお、これからの検討および実用装置では検出器DTとして感度が高くかつ検出速度が速い超高感度リニアイメージセンサIMDを用いている⁵⁾。IMDはイメージインテンシファイアとリニアイメージセンサを組み合わせたものである。この結果はのちほど示す。

2.3 ボイド検出特性

図3(a)に開口数0.25の対物レンズOLの開口全面を満たすレーザー光束を用いて直径 $2r$ のスルーホールを照明した場合の照明光の光路を示す（レーザーの絞り込み角 $\theta_B = \sin^{-1} 0.25$ ）。基板の奥に進む照明光はスルーホールの壁面により数回の反射を繰り返した光が含まれている。反射回数が多いと照明光が減衰する。また、スルーホール壁面（銅）の上にはわずかに銅以外の物質が残留するので、微弱ながら蛍光が発生する。この蛍光は検出信号のSN比を悪化させる。前述したように本研究は微小なボイドを検出することを目的としているので、深い位置にあるボイドを感度よく検出するためには、レーザー光の反射回数を減らすことが望ましい。そこで同図(b)に示すような照明光路を採用した（これを光路Aと呼ぶ）。同図は対物レンズOLの開口の1/4を満たすレーザー照明光束を用いたものであり、レーザー光線の絞り込み角 θ_A が小さい（ $\theta_A = \sin^{-1} 0.125$ ）。レーザー光の集光点は配線板の上面内（ $Z=0$ ）にある。

Fig. 3 Analysis of illumination optics

Fig. 4 Artificial void

このような光路 A を用いてボイドの検出実験を行った。図 4 は実験に用いた模擬ボイドの形状を示す。この模擬ボイドの作り方は次のようである。基板を Z 軸と平行な面で研磨してスルーホールが半円形分だけ残るようにしたあと、全面に薄く銅めっきを施して、スルーホールの内壁に $\phi 150 \mu\text{m}$ の穴をあけた基板を作る。もう一つ同じように研磨した基板を用意して、両者を貼り合わせることで作り出すものである（全面銅めっきを施した理由は貼合せのすきまから蛍光が発生することを避けるためである）。このようなサンプルは深さ 0.5 mm おきにボイドを造り、合計 8 個のサンプルを造った。蛍光の発生量が露出基材面の表面積に比例すると考えた場合、 $\phi 150 \mu\text{m}$ のボイドは換算すると幅約 $20 \mu\text{m}$ の環状ボイドの表面積に相当する（銅めっき前のスルーホール径を $\phi 0.3 \text{ mm}$ とした場合）。

ボイドの検出結果を図 5 (a), (b), (c) に示す。同図に示すようにボイドの深さ $Z=1.5 \text{ mm}$ のときに 3 つの内でも最も大きな検出信号レベルが得られた。 $Z=3.5 \text{ mm}$ においても検出が可能な SN 比の検出信号が得られた。図 6 に横軸をボイドの深さ Z に取り、縦軸に検出信号の SN 比を取ったグラフを示す。「光路 A (Illumination A)」と示した線が以上に示した検出結果である。

以上の検出に用いた超高感度リニアイメージセンサ IMD の積分時間は 10 ms である。IMD の特性から検出器上の蛍光光量レベルは $2 \times 10^{-7} \text{ W/cm}^2$ 程度と推察される。IMD の受光部の形状は $256 \times 25 (\mu\text{m})$ 細長い感光エレメントが 256 個並んでおり、自己走査するので同図に示すように蛍光分布が観測でき

Fig. 5 Detected signals for artificial voids at Z

Fig. 6 Detected SN ratio of detected signals for artificial voids at Z

る。本ボイド検出法は、スルーホールから蛍光が放出されているかどうかを判定すれば良いのであるから、リニアイメージセンサあるいは TV カメラのような画像検出器は本来必要ない。光電子増倍管で目的を達成することができるはずである。しかし画像検出器を用いることによって、蛍光の空間的放出特性が把握でき、光学系の最適セッティングを行うことができる。また、検査装置を工場で稼働させる場合の装置保守においても、光学系の状態を把握する上で有用であることが分かった。

このように深さ $Z=3.5 \text{ mm}$ にある $\phi 150 \mu\text{m}$ のボイドを検出できることが明らかになった。しかし、以上に説明した光路 A ではスルーホールの入口付近にあるボイドは検出できない。これはこの光路 A ではスルーホール入口付近の壁面に照明光が当たらないのであるから当然である。この問題を解決するためには、光路 A に加えて、図 3 (c) に示したようなスルーホール入口付近を照明する光路 B を採用すればよい。同図に示した照明光は専ら入口部にあるボイドを検出すればいいのであるから、照明光量は低くてよい。このことは入口部付近にあるボイド検出用の光路 B は深部ボイド検出信号の SN 比に悪影響を及ぼさないことを意味している。

図 5 の (d), (e), (f) は光路 B の照明により検出した結果を示す。 $Z \approx 0 \text{ mm}$ (入口付近のボイド)、 $Z=1.0 \text{ mm}$ にあるボイドが検出できることが分かる。図 6 の線「光路 B」はボイド検出信号の SN 比をプロットした結果を示す。光路 A および光路 B により、スルーホールの深さ $Z=0 \sim 3.5 \text{ mm}$ にあるボイドの検出に成功することができた。以上に示した光路 A

および光路 B の照明を同時に実現する光学系は図 2 に示されている。なお、光路 A と光路 B の照明光量の比率は約 10 : 1 である。

2.4 検出結果の考察

ボイドから発生する蛍光の強度を次のようなモデルにより計算した。図 3 (b) に示すように、レーザー光は点 FA 2 で集光し、最大角度 θ_A で発散しながらスルーホール側面を照明するものとする。レーザー照明光束の強度分布を正規分布と仮定し、点 FA 2 を中心とする発散角度 θ を変数とすると、レーザー光のスルーホール面での照明強度の分布 $I(\theta)$ は次のように表される。

$$I(\theta) = \frac{\sin \theta}{\rho^2} \cdot \exp \left[-\frac{(k \cdot \theta)^2}{2} \right] \quad (1)$$

式 (1) は、スルーホールに入射する正規分布の光強度 $\exp(-(k \cdot \theta)^2/2)$ が光路の長さ ρ の自乗に逆比例して減衰するとし、かつ、照明光はスルーホー

Fig. 7 Intensity distribution of illumination A on the wall of a through-hole (calculation)

ル壁面に対して、斜めに入射するのであるからスルーホール側面に入射する光の強さとして $\sin \theta$ の項をつけた。 ρ は点 FA 2 から壁面までの光路の長さ、 k は正規分布レーザー光の広がりを出すパラメータである。

この式を $\rho^2 = Z^2 + r^2$, $\sin \theta = r / (Z^2 + r^2)^{1/2}$ の関係を用い、深さ Z の関数として示すと式 (2) のようになる。

$$I(Z) = \frac{r}{(Z^2 + r^2)^{3/2}} \cdot \exp \left[- \frac{\left\{ k \cdot \sin^{-1} \left(\frac{r}{(Z^2 + r^2)^{1/2}} \right) \right\}^2}{2} \right] + R \cdot \frac{r}{((Z/3)^2 + r^2)^{3/2}} \cdot \exp \left[- \frac{\left\{ k \cdot \sin^{-1} \left(\frac{r}{((Z/3)^2 + r^2)^{1/2}} \right) \right\}^2}{2} \right] \quad (2)$$

ただし式 (2) には第 2 項を加えたが、これは、図 3 (a) に示す 1 回壁面に反射して再び壁面に入射する光 (2 次光) の強度を示すものである。 R は壁面の光反射率を表す。同式は 2 次の反射の効果までしか考慮していないが、スルーホールの壁面は鏡面ではなく、拡散性かつ光吸収性であるので、2 次反射までの効果を考慮した。 $k=15$, $R=0.35$ としたときの式 (2) のプロット結果を図 7 に示す。蛍光の検出光量が式 (2) に比例すると思えば、この結果は、実験結果 (図 6) を説明していると思われる。 $k=15$ で実験結果にはほぼ一致することは、図 3 (d) に示すように、レーザー光の角度分布は、正規分布強度が $0.172 \cdot I_0$ になるところがレーザー光線の絞り込み角 $\theta_A = \sin^{-1} 0.125$ に一致する分布であることを示している。

3. 検査装置

3.1 検査装置の構成と機能

(1) 検査対象プリント配線基板

検査対象のプリント配線基板は外形 $600 \times 800 \times t7$ (mm) である。この配線基板上にスルーホールが最小 0.135 mm の間隔で並んでいる。スルーホールはパッドと言われる大きさ 0.85 mm の四角い銅電極の上にあけられており、個数は約 $30,000$ 個である。

(2) 検査装置の構成

検査装置を開発した。装置は XY ステージおよび図 2 に示した検出光学系を有する。プリント配線基板は XY ステージ上に乗せられ、各々のスルーホールは検出光学系の対物レンズの下に位置決めされたあと、Ar レーザ光が照射される。ス

ルーホールにボイドがある場合、レーザー光照射によりスルーホールから蛍光が放出されるので、これを検出器 DT により検出すればボイドを検出することができる。スルーホール位置は穴あけ機用の NC データから得ることができる。XY ステージの送り時間は 0.18 s/ 0.135 mm である。

Ar レーザは、高い照度の照明を実現し、かつ寿命を長く保つためにレーザーの間欠発振を行った。すなわち、XY ステージが止まった時点でレーザーをパルス発振して、発生する蛍光を検出するようにした。レーザーパルスの幅は約 200 ms、パワーレベルは時間平均値で約 100 mW である。また、本装置は自動焦点機能も有している。

(3) スルーホールの位置合わせ

プリント配線基板はエッチングや、温度などの影響により伸縮することがある。スルーホールの中に正確にレーザー光を照射するために、本装置は検査開始前に基板四隅にあるパッドにあげられているスルーホールの位置を検出し、このデータに基づいて各穴の位置の補正データを内挿により求める機能を有している。なおスルーホール位置の検出はスルーホール検査用の対物レンズ OL による拡大パッド像を図 2 に示した CCD TV カメラにより検出して行う。この際、照明光路に凹レンズ CL を挿入することにより、照明光の光束径を広げてパッド全体を照明できるようにした。このとき、画像の検出は、図 2 の “Barrier Filter BF” を取り除いて行う。こうすることにより照明を正反射する銅製パッド部は「明」、光を反射しないスルーホール部は「暗」として見えるので、スルーホール位置を検出することができる (“Barrier Filter BF” が入っているとき、パッド、スルーホールとも通常は蛍光を発生しないので暗く見え、スルーホール位置は検出できない)。

(4) Ar レーザ回折光の遮断

ボイド検査を行うとき、Ar レーザ照明光はスルーホールにのみ入射するように光路が考えられているが、実際は微弱ながら回折光が配線基板上に拡散する。基板面上には蛍光を発生する基板基材がむき出しの状態であるので、蛍光が発生する。ボイドから発生する蛍光は微弱であるので、基板面から発生する蛍光は検出信号に悪影響を及ぼす。これを防ぐために、図 2 の “Aperture” と示したピンホールを対物レンズの先に挿入した。これによって、照明光は、スルーホールにのみ入射ようになる。このピンホールは検出視野を狭くするので、位置合わせ用のパッド検出を行うとき、パッド部分を覆ってしまうので自動的に取外しを行う。

3.2 穴詰まりの検査

本装置はスルーホールボイドのほかにもスルーホールの穴詰まりを検出することができる。これは、配線板ホルダの下側 (ステージ内部) にフォトダイオードを挿入してスルーホールを通して来る照明レーザー光の強度をモニターすることにより検査する。フォトダイオードの出力はステージがスルーホールの下で停止した時点で計測される。

3.3 検出したスルーホール欠陥の確認

以上説明した検査法によりスルーホール欠陥を検出することができる。次に、検出したスルーホール欠陥がどの程度致命的な欠陥であるかを確認する手段が必要である。このためには X 線による透過像の観察が考えられるが、解像力の点で十分でない。そこで、確認のために以下に示す $\phi 0.19$ mm の極細径ファイバースコープを開発し、直接スルーホールの内壁面を観察することができるようになった⁶⁾。

Fig. 8 Structure of the end of the small diameter fiber scope (Image input side)

Fig. 9 Small diameter fiber scope and the optical system to observe the inside of a through-hole

ファイバ스코プの先端形状を図8に示す。また、このファイバ스코プを用いて観察を行う光学系を図9に示す。ファイバ스코プは照明用ファイバ、イメージファイバおよびロッドレンズからなる。イメージファイバは $\phi 2.5 \mu\text{m}$ のファイバを1600本配列したものである。このイメージファイバにスルーホール内壁像を投影するためにロッドレンズを用いる。ロッドレンズによって視野角 ϕ および焦点距離 f が決まるが、試行によると $\phi=70^\circ$ 、 $f=1 \text{ mm}$ 弱が観察しやすかった。

スルーホール内壁の観察は図9に示すようにファイバ스코プ先端をスルーホール内に差し入れる。スルーホール内壁は照明用ファイバを通った光により照明される。内壁の反射光(観察光)はイメージファイバを通してファイバ스코プの射出端に伝達されるので、この像を顕微鏡の対物レンズによってTVカメラ上に拡大投影し観察する(接眼レンズによって直接目視観察することも可能)。この反射照明によってスルーホール内壁の色、変色、凹凸、異物などの表面状態を観察することができる。

また、この観察光学系によって蛍光を用いて観察を行うこともできる。この場合、緑色照明光(蛍光用励起光)は対物レンズを経由して、ファイバ스코プの射出端に入射する。次に励起光はイメージファイバを通り、先端のロッドレンズを介して内壁を照明する。内壁から発生する蛍光は、反射照明の場合と同じくファイバ스코プの射出端に伝達されるので、TVカメラにより蛍光内壁像を観察できる。この光学系において照明光(励起光)と観察光(蛍光)は同じイメージファイバを通るが、

Fig. 10 Observation of a through-hole with an artificial void by the fiber scope

両者は波長分離をするので照明光は観察像にハレーションなどの悪影響を与えない。

図10は本観察系による模擬ボイドの観察結果を示す。同図(a)に示す反射光照明の場合、内壁の銅めっき部分は明るく、ボイド部分は暗く見える。同図ではスルーホールの出口、およびスルーホールの接着部分が見える。同図(b)には蛍光による観察像を示す。この場合、見えるのは蛍光を発生する部分だけであるので、模擬ボイドの部分明るく見える。 $\phi 0.24 \text{ mm}$ 程度の穴の内部を直接観察することは従来不可能であり、本極細径ファイバ스코プにより初めて可能となった。

4. 結 論

- (1) 以上に述べたように2つの光路を持つArレーザ照明光によりスルーホールを照明し、ボイドから発生する蛍光を検出することによって、アスペクト比約30のスルーホールの深さ3.5 mmにあるボイドを検出する技術を開発した。
- (2) 検出可能なボイドの大きさは、 $\phi 0.15 \text{ mm}$ 模擬ボイドであり、このボイドの面積は幅 $20 \mu\text{m}$ の環状ボイドの面積に相当する。
- (3) スルーホールの穴詰まりを検査する手段、および、発見したボイドを観察する $\phi 0.19 \text{ mm}$ の極細径イメージファイバを開発した。

これらの技術は、高密度プリント配線板を製造するうえで極めて有用である。

最後に、本検査装置を製作するうえでご尽力いただいた日立東部セミコンダクタ(株)西山亮哉氏、瓜生康三郎氏ほかの方々に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) M. Ando and T. Inagaki: Automated Inspection of Plated Through-holes for Ultrahigh-density Printed Wiring Boards, Machine Vision and Appl., 1, (1988) 175.
- 2) 原 靖彦ほか: プリント基板スルーホールボイド検査装置, 精密工学会誌, 56, 5 (1990) 837.
- 3) 原 靖彦: 蛍光を利用した画像検出とその応用, 精密工学会誌, 56, 8 (1990) 1381.
- 4) 原 靖彦ほか: 高アスペクト比スルーホールボイド欠陥検査法, 1992年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1992) 625.
- 5) 浜松フォトリクス: 高感度マルチチャンネル光検出器IMD.
- 6) 原 靖彦ほか: スルーホール内壁観察用極細径ファイバ스코プ, プリント回路学会第6回学術講演大会論文集, (1991) 169.