EOプローブを用いた非接触LSIパッケージ はんだ接続検査手法の開発*

與 島 政 幸** 久 住 肇*** 西 山 毅†

Non-contact LSI-package Solder-joint Inspection Method Using an Electro-optic Probe

Masayuki YOJIMA, Hajime KUZUMI and Takeshi NISHIYAMA

They have developed a non-contact, high-speed, and multipurpose solder-joint inspection method using an electro-optic (EO) probe for fine-pitch LSI-packages on printed wiring boards. The EO probe was used to detect the electric field intensity above two adjoining leads of a LSI-package with no damage. They also developed a solenoid-actuator probe that could supply alternating voltages to the lead-pad on the board at high-speed motion. By scanning the two probes mechanically at a constant velocity and by actuating the solenoid-actuator at a constant frequency above each side of the LSI-package, they could achieve a high-speed inspection. And by applying this method to a QFP package that has a 0.5-mm pitch, they succeeded in locating the open and short failures at a scanning speed of 50-pin-per-second.

Key words: solder-joint inspection, electro-optic effect, actuator, mechanical scanning

1. 緒 言

軽薄短小化へのニーズが著しいパソコン、携帯電話、PDA (personal digital assistants) といった情報通信端末では、表面実装技術の進展により微細化・高密度化が進展している。これに伴い、主流 LSI パッケージである QFP (quad flat package) においては、0.5mm ピッチで 200~300 ピンクラスの大型品がほとんどのプリント基板で実装されるようになってきた。また、最近では、よりパッケージサイズが小さい CSP (chip size package) 等のエリアアレイ型パッケージの進展も著しい。このような実装の高密度化に伴い、実装部品のはんだ接続検査は、製造品質の確保並びに生産性向上の面でますます重要になってきている。

接続検査の代表的な方法として、抵抗測定と容量測定が挙げられる¹⁾²⁾。抵抗測定の場合、四端子測定によりその他の測定方法では検査の難しい電源、グラウンド端子の接続検査ができる反面、触針検査であるため狭ピッチ・多ピンパッケージの検査には、損傷や検査時間の面で課題がある。一方、容量測定は、非接触測定が可能である反面、被測定パッケージに対応した専用のセンシングを設ける必要があり汎用性に欠ける上、ショート検査は困難である。

そこで、我々は、非接触で電界を測定できる電気光学効果 (EO 効果) に着目した新しい非接触式の検査手法を開発した。EO 効果 (ポッケルス効果) とは電界中に置かれた EO 結晶が複屈折率変化を受ける現象であり、この屈折率の変化を光学的に検出することで電界を測定できる。EO 応用計測は、非接触、非侵襲、高速、高空間分解能といった特徴を持ち、これまで LSI 等の微細領域の高周波測定に応用されている³⁾⁴⁾。通常 EO プローブを用いた信号計測は、検出感度やクロストークの問題から EO 結晶または金属体を被測定物に対して数十 μm まで近接

して行う。しかしながら我々の用途においては、精密な信号計測が目的ではなく、はんだの接続状態の差異が検出できれば良い。また、クロストークは逆にショート検出に応用できる。

このような着想で、基板側パッドに信号印加し該当リードの電界を約 1mm の空間ギャップを設けて EO プローブで計測することで、オープン/ショートの同時検出に成功した^{5)~7)}。合わせて高速化のためにソレノイド型の給電プローブを開発し、これら 2 本のプローブを被測定パッケージに対して等速度で連続走査することにより、50 端子/s の高速検査を実現した。

この論文では、本検査方法の原理と検出特性、また、実際の検査に適用した結果について報告する。

2. 装置仕様とシステム構成

2.1 主要仕様

表 1 に本検査装置の主要仕様を示す。検査対象はリードフレーム型 LSI パッケージ、対応最小ピッチは 0.4mm、また、測定時に基板パッドに印加する信号は、LSI パッケージを破壊することのない 1V の交流信号 ($f = 50\text{kHz}$) である。

2.2 システム構成

図 1 にシステム構成を示す。本システムは、基板をセットする XY ステージ、EO プローブと給電プローブを位置決めするセンサヘッド部、EO プローブの検出信号を処理する信号処理回路、それに全体を制御するパソコンから主に構成されている。

EO プローブと給電プローブは、高さ位置決め用の Z ステージ上に固定され、さらに EO プローブ側には被測定 LSI のリード長に合わせて 2 本のプローブ間距離を調整するためのステー

Table 1 Main specifications

Items	Specifications
Target LSI-packages	QFP, SOP, SOJ
Minimum pitch	0.4mm
Inspection items	Open, Short
EO probe air-gap	1mm
Supply voltage	1V _{p-p} ($f = 5\text{kHz}$)
Inspection speed	50 pins / s

* 原稿受付 平成 11 年 12 月 28 日

** 正 会 員 日本電気 (株) 評価技術開発本部 (川崎市中原区下沼部 1753)

*** 日本電気 (株) システム LSI 事業本部 第二システム LSI 事業部

† 日本電気 (株) 光ネットワーク事業本部 アクセス事業部

Fig. 1 System configuration

Fig. 2 Zoom-up of the probe heads

ジが備えてある。また、センサヘッド部には、これらのプローブの位置決めに必要な CCD カメラとレーザ変位計、それに測定する LSI パッケージの各辺に合わせてプローブユニット全体を回転するための回転ステージが備えてある。

関数発生器の交流信号を基板パッドに印加する給電プローブは、任意波形発生器で動作制御されており、あらかじめ駆動信号を最適化することでソフトコンタクトを実現している。一方、EO プローブで測定した検出信号は、信号処理回路で増幅・積分処理された後、A/D 変換ボードを介してパソコンに取り込まれ処理される。また被検査基板のグラウンドは供給信号源のグラウンドに接地されており、交流信号の印加に伴う基板の内層グラウンドや電源、あるいは LSI 内部のグラウンド、電源ラインからの信号の回り込みを除去している。

図 2 に、プローブユニット部の拡大写真を示す。

3. EO センシング技術

3.1 EO プローブの構造と検出原理

EO 効果とは、物質の屈折率が電界の強度に応じて変化する現象であり、EO 結晶にレーザ光を入射した場合の位相差 δ は式 (1) で与えられる。図 3 は開発した EO プローブの構造を

Fig. 3 Structure of the EO probe

Table 2 Specification of the EO probe

EO crystal	Material	CdTe ($n = 2.8$, $r = 6.8 \text{ pm/V}$)
	Transmission wavelength	$> 0.9 \mu\text{m}$
	Size	$300 \mu\text{m} \square \times 500 \mu\text{m}$
Laser	Wavelength	$1.3 \mu\text{m}$
	Power	12.5 mW (MAX)
	Spot diameter	$20 \mu\text{m}$

示しており、EO 結晶はプローブ先端に設置されてある。直径 14 mm 、長さ 110 mm 程度のペン型プローブである。表 2 に光学仕様を示す。以下動作原理を説明する。

直線偏光のレーザ光は、アイソレータを介して、P 偏光は一部、S 偏光は全部を反射する偏光ビームスプリッタを透過後、集光レンズでプローブ先端の EO 結晶に偏光面が結晶軸に対して 45° 傾いて入射される。結晶裏面の反射膜で反射したレーザ光は再び偏光ビームスプリッタに入射し、入射方向とは異なる方向に反射される。反射光は、 $1/4$ 波長板を透過後ウオラストプリズムで直交する 2 成分に分光され、2 チャンネル PD で受光される。電界中に置かれた EO 結晶中を往復した直線偏光のレーザ光は偏光変化を受け楕円偏光となるが、 $1/4$ 波長板で楕円の程度に比例した傾きの直線偏光になり、2 チャンネル PD で差分信号として検出される。

$$\delta = \frac{\pi}{\lambda} r^3 n_0^3 E \quad (1)$$

ここで、 λ : 波長、 r : 電気光学定数、 n_0 : 常光の屈折率、 l : 結晶中の光路長 ($= 2d$, d : 結晶厚)、 E : 電界強度。

3.2 検出感度特性

0.5 mm ピッチのパッドサンプルを用いて、リニアリティ特性及び空間ギャップ特性を評価した。

図 4 は、空間ギャップ 1 mm におけるパッド印加電圧に対する EO プローブの検出強度を示した図である。印加電圧に対して良好な線形性を示していることがわかる。

図 5 は、空間ギャップと EO プローブの検出強度の関係を示

Fig. 4 Linearity characteristics

Fig. 5 Relationship between output sensitivity and air gap

した図である。検出強度は、空間ギャップの増加に伴い急激に減少する。空間ギャップは装置システム仕様を決める重要要素である。空間ギャップを小さくした場合、検出感度は高くなるが空間ギャップに対する検出強度の変化率が大きく、高精度な空間ギャップの制御手段が必要となる。一方、空間ギャップを大きくした場合、検出感度は低くなるが空間ギャップに対する検出強度の変化率が小さく、空間ギャップの許容変動幅を大きくでき、装置構成を簡素化できる。本システムでは、初期アライメント補正で要求精度と感度を共に実現できる空間ギャップとして1mmを設定した。

4. 高速メカニカル走査

4.1 給電プローブ

給電機構の高速化を図るために、ソレノイド型給電プローブを開発した。図6にその構造を示す。全長約50mm、ワイヤストローク約0.7mm、プロービング動作時間約1msである。測定時のプローブ押込み量(約0.2mm)とプローブ駆動信号(任意波形発生器)を実験的に最適化することで、安定かつダメージの少ないソフトコンタクトを実現した。

4.2 メカニカルライン走査

図7は、EOプローブと給電プローブをLSIパッケージ上で等速走査し、パッド位置に同期して給電プローブをプロービング動作させるメカニカルライン走査のシステム構成図である。

加速区間(約3mm)で加速され一定速度でLSIチップ上を走査するEOプローブと給電プローブの位置はラインレシーバのパルス数でモニタされている。2本のプローブが最初のリード位置に達するとカウンタボードからトリガ信号が出力され、このトリガ信号を基に任意波形発生器がリードの本数分バースト発振する。任意波形発生器の発信周波数をプローブの移動速度÷リードピッチで設定することにより、各種ピッチに対応できる。実際のシステムにおいてはLSIチップ側が移動する構成で、50端子/sの高速検査を実現できた。

Fig. 6 Structure of the contact probe

Fig.7 Schematic of the mechanical scanning

4.3 検出信号のデータ処理

図8に、サンプリング入力したEOプローブ検出信号及び給電プローブ駆動信号の一例を示す。

同図において、プローブ駆動信号が印加されている時間領域におけるEO検出信号が各リード端子の測定値に相当する。

データ処理は、各リードの測定値に対して、信号検出エリア、オフセット検出エリアをパラメータで設定し、信号についてはそのエリアの最大値を、また、オフセットについてはそのエリアの平均値をそれぞれ算出する。その後、信号検出値の最大値からオフセット値を減算した値を各リードの測定値として用いる。信号検出値に最大値を用いている理由は、給電プローブがコンタクト時間内に被測定パッドから離脱した場合、検出値が低下し、平均値では正確な値が得られないからである。信号処理回路では積分器による平均化処理を行っており、立ち上がり要する時間は5ms以下である。従って、給電プローブのコンタクト時間内(検査速度50端子/s、デューティ40%の条件で16ms)に少なくとも5ms程度の接触コンタクトがあれば正確な測定が可能である。

Fig. 8 Illustration of the signal processing

5. 基板グランドの接地効果

5.1 信号の回り込み

実際の QFP を用いて、基板グランドを信号源のグランドに接続した場合と開放にした場合での検出強度の違いを評価した。図 9 はその測定結果である。これより以下のことがわかる。

- ・グランド未接地の場合、基板の電源ラインにプルアップされた端子は、他の端子に比べ検出強度が大きくなる。
- ・グランド端子を接地した場合、未接地に比べ検出強度は小さくなるが、端子間での強度差は小さくなる。
- ・電源ラインにプルアップされた端子は、未接地状態ではオープン検出が困難である。
- ・正常に対するショートの変化率は、接地した方が未接地に比べ大きい。
- ・未使用端子は、接地・未接地で検出強度はほとんど変わらない。

図 10 は、実際の信号の回り込み例を示したものである。基板グランドが開放状態では、グランドや他の信号端子へ信号の回り込みが起きている。これらの信号の回り込みは、IC 内部で信号端子とグランドが保護ダイオードを介してつながっていることに起因している。これ以外にも信号端子が回路基板上でプルアップ・プルダウンされていると、信号の回り込み要因となる。これらの信号の回り込みは基板グランドを接地することでほとんど解消されており、正確な検査に基板グランドの接地が有効であることがわかる。

Fig. 9 Comparison of detection intensity between floating and grounding

Fig.10 Examples of signal transmission

5.2 ショート検出

本検査手法では、隣接リードからの電界も同時に検出することで、オープン不良に加えショート不良も同時に検出している。そこで、ショート不良箇所を持つパッドサンプル基板上をメカニカル走査（走査速度：50 端子/s）し、ショート検出性能を評価した。実験ではショートパッドの隣接パッドを、

a) グランドに落とす

b) 開放状態にする

の2つの状態に設定し、それぞれ正常パッドに対するショートパッドの検出強度の変化率を評価した。それぞれの条件で、パッドピッチと空間ギャップを変え実験を行った。実験の概要を図 11 に、その結果を図 12 に示す。実験結果から以下のことがわかる。

- ・隣接パッドを接地することにより、ショート変化率は開放状態に比べ大きくなる。（約 1.3 倍→2 倍）
- ・空間ギャップ $1 \pm 0.5 \text{ mm}$ の範囲においてショート変化率はほぼ一定である。
- ・ショート変化率はパッドピッチに依存し、パッドピッチが大きい程小さくなる。

実際の検査においては、基板グランドを接地するため隣接端子は接地状態と見なして良く、実用性の高いショート変化率を実現できる。

なお、パッドピッチに対するショート変化率は、パッドピッチに対する EO 結晶のサイズが関係しており、EO 結晶サイズを大きくすることで大ピッチにも対応可能である。

Fig. 11 Sample board for the experiment of short-to-normal ratio

Fig. 12 Result of short-to-normal ratio

6. 実用評価

6.1 測定再現性

同一の QFP（ピッチ 0.5mm, 240 ピン）を 50 端子/s 秒の速さで 10 回測定し再現性を評価した。図 13 は走査ごとにその結果をまとめたもので、各ピンの平均値に加え最大値と最小値の範囲が示されている。同図において測定値がゼロレベルの端子は電源、グランド端子である。この図から、端子間で検出電圧は異なるものの、比較的良好な再現性を示していることが確認できる。なお、3 辺（145～149 ピン）の一部の端子は他の端子と比べ値がかなり小さくなっている。この原因は、これらの端子がコンデンサを介して基板グランドに接続されているためである。これらの端子では信号端子とグランド間のインピーダンスが小さくなり、使用した関数発生器の電流容量では設定電圧 1V を印加ができなかったことに起因している。

図 14 は、平均値を基準値として各測定値の偏差を求めた結果である。偏差の算出においては、EO プローブの位置決め誤差（XY 位置と空間ギャップ）やプローブ感度の変動に起因する測定間でのレベル変動を補正するために、式（2）を用いて測定値を補正した。

$$P_i = V_i \times AVE_{ref} / AVE_i \tag{2}$$

- P_i : 各端子の補正検出電圧
- V_i : 各端子の検出測定電圧
- AVE_{ref} : 基準値における辺走査平均値（ただし電源、グランド端子は除く）
- AVE_i : 測定値での辺走査平均値（ただし電源、グランド端子は除く）

Fig. 13 Measurement reproducibility

Fig. 14 Measurement accuracy

同図には、偏差の最大、最小が示されてあるが、ほとんどの端子が基準値に対して偏差±10%以内に収まっていることがわかる。

6.2 オープン/ショート検出

不良検出の実用性を評価するために、同一の製品基板 2 枚を用いて、1 枚の基板にオープンとショートの不良を造り込み、両者の測定結果を比較した。測定にはモールド厚が異なる 2 種類の QFP を用いた。表 3 にそれぞれの QFP の仕様を示す。

図 15, 16 は薄肉タイプ、厚肉タイプそれぞれの測定結果である。これらの図において、図(a)は検出電圧、図(b)は良品に対する不良品の検出電圧比をそれぞれ表している。また、図中検出電圧が小さい端子は電源、グランド端子である。

検出電圧比の算出においては、走査ごとの平均値を用いて先に説明した式(2)を用いて不良品の測定値を補正した。また、平均値の算出においては、不良端子の影響を少なくするために電源、グランド端子を除くという処置に加え、残った端子の中で、検出電圧が大きい方、小さい方からそれぞれ数端子を除く（良品においても不良品と同じ端子を対象外として平均値算出）という処置を行った。

良品との比較結果から、オープン端子は 1/3 以下、ショート端子は 2 倍程度にそれぞれ変化していることがわかる。一方、他の正常端子は 1 ± 0.2 の範囲にほぼ入っており、不良端子を容易に識別できることがわかる。例えば、オープン判定レベルを 0.5 倍、ショート判定レベルを 1.5 倍に設定することで、両タイプの QFP の不良検出が可能である。

Table 3 Specifications of QFPs

	QFP_1	QFP_2
Pitch	0.5mm	0.5mm
Number of leads	100	240
Mold thickness	1.45mm	3.2mm
Lead length	1.0mm	1.3mm

(a) Detection voltage

(b) Ratio of detection voltage

Fig. 15 Open/short detection (100-pin QFP)

なお、ショート端子2本に検出強度の差が見られる。これはEOプローブを被測定端子に対してメカニカル走査しながら測定しているため、測定対象の端子ペアが順次入れ代わるためである。検査上はいずれかの端子でショート不良を検出できれば良く、実用上の問題はない。

7. 結 言

EOセンシング技術を応用した非接触のLSIパッケージはんだ接続検査手法を提案し、新たに開発したEOプローブとソレノイド型給電プローブを用いて、汎用的で高速な検査方法を実現した。主な成果をまとめる。

- (1) 基板パッドに信号を印加し、リードに誘起される電界を近接配置したEOプローブで計測する新しい非接触式のはんだ接続検査方法を提案した。
- (2) 高感度のEOプローブを開発し、空間ギャップ1mmでの非接触検出を実現した。
- (3) 隣接リード端子からの電界も合わせて検出することにより、オープンに加えショート不良も同時に検出できた。
- (4) 基板グラウンドを接地することにより、オープンに対して1/3以下に、またショートは約2倍に出力変化し、安定した不良検出ができることを示した。
- (5) ソレノイド型給電プローブとEOプローブを被測定LSIパッケージに対して等速移動するライン走査により、50端子/sの高速検査を実現した。

(a) Detection voltage

(b) Ratio of detection voltage

Fig. 16 Open/short detection (240-pin QFP)

参 考 文 献

- (1) R. K. Kerschner : Positive Electrode System for Detecting Open Solder Joints in Printed Circuit Assemblies, U.S. Patent 5,420,500, May 30, 1995.
- (2) 日置電気, X-Y インサーキットテスタカタログ
- (3) T. Nagatsuma : Electro-Optic Testing Technology for High-Speed LSIs, IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. E79-C, (1996) 482.
- (4) 高橋宏典ほか：非接触電界センサを用いた超高速電圧波形測定装置, LSI テスティングシンポジウム技術資料 (1995).
- (5) 與島政幸, 久住 肇：EO センサによる非接触 QFP 半田接続検査技術の開発, 1996 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1996) 427.
- (6) M. Yojima, H. Kuzumi, and T. Nishiyama : Non-contact LSI-package Solder-joint Inspection Method using an Electro-optic Probe, Proc. IMAPS'98, (1998) 132.
- (7) 與島政幸, 久住 肇, 西山 毅：EO センサによる非接触 QFP 半田接続検査装置の開発, 1998 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1998) 517.