電子部品、新材料を対象とした超音波探査技術

New Ultrasonic Testing for Electronic Components and Advanced Materials

野 中 寿 夫

Toshio NONAKA

Key Words : Material Testing, Measurements, Ultrasonic Testing, Electronic Components, Ceramics

1. はじめに

機械技術者にとって製品の信頼性向上は最も重要な設計課題の一つである。近年、エレクトロニクスや材料面での飛躍的發展によって高度な機械設計技術が要求されるようになってきた。その結果、メカニクスとエレクトロニクスの複合化が進み製品のシステム化、複雑化にいつそう拍車がかかってきた。エレクトロニクス化の進展によって製品に使われる部品の点数が著しく増加し、故障の状況も従来とは異なってきている。今や1枚のシリコンチップの上に200万個以上のエレメントが組みこまれたものも市販されていると言われて⁽¹⁾。このような高集積回路が用いられるようになると、この中のわずか1素子の故障により、システム全体が停止してしまう恐れもあり、電子部品の信頼性がいつそう重要になる。一方、新素材の分野でもセラミックス、複合材など、より高強度な材料が相ついで開発されている。セラミックスを例にとると、この材料では集中応力を緩和するような変形ができないため、欠陥部で応力集中を生じ、わずか10 μ mの欠陥の存在でも破壊を引き起こす恐れがあると言われている。これら電子部品や新素材の多くは、微小な欠陥検出が必要であるが、従来の非破壊検査技術の多くが金属系の比較的大きい欠陥探傷を目的としていたた

め、新しい用途に十分対応できなくなってきた。このような背景からさらに高度な検査手法の確立が望まれるようになってきた。ここではこのような要望にこたえるために開発された、新しい超音波探査技術について紹介する。

2. 超音波による欠陥探傷

初めに最も基本的な水浸法による超音波測定法を図1により説明する。ここでは試片内部の微小欠陥を検出するため焦点形探触子を使っている。探触子は高電圧パルスが加えられると超音波を発生する。超音波は材料内部を弾性波として進行し、欠陥があればそこで反射する。この反射信号は逆の径路で探触子に戻り、電気信号に変えられ右図のようにブラウン管上に表示される。Tは送信パルス、Sは表面からのエコー、Fは欠陥からのエコーを示す。このような表示をAスコープと

図1 超音波による欠陥探傷

呼ぶ。均質な材質であれば音速は一定であるから、時間軸はそのまま探触子と材料内の距離に置き換えられる。そこで所定の位置に相当する範囲にゲートを掛け、この範囲内の信号のピーク値を取りだせばその深さにおける音響的特性を示す信号が得られる。この状態で探触子を超音波の進行方向と直角平面内で相対移動させ、次々と得られる信号レベルを輝度変調してブラウン管上に表せば一断面内の音響像が得られる。これがCスコープであり、面の情報を表す、欠陥およびその近傍の情報より高度な解析を行うことができる。焦点形探触子の焦点位置におけるビーム径は超音波の波長に比例する。従って、周波数が高くなるほど、ビーム径が細く絞れ欠陥検出の分解能が向上する。しかし高周波になればなるほど媒質中における超音波の減衰が激しいため、目的に合った探触子の選定が重要になる。

3. 超音波探査映像システム⁽²⁾

欠陥から反射するエコー強度は音響インピーダンス（密度×音速）に関係する。図1において試験片の材質の音響インピーダンスを Z_1 、欠陥のそれを Z_2 とすると、欠陥による音圧反射率は

$$R = -\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \dots\dots\dots (1)$$

で表される。従来の鋼構造物系の欠陥探傷はサイズの大きいクラックの検出が主であり、超音波は空気層で反射する。空気のインピーダンスは鋼に対して約 $1/10^5$ であるため超音波は 100% 反射さ

れる。これは最も測定に適した条件であり、分解能も 10 MHz 以下の周波数で十分であった。しかし電子部品や新素材の欠陥検出では状況がかなり異なってくる。従来の探傷との相違点は、

- (1) 検出が必要とされる欠陥サイズは $10\mu\text{m}$ 程度であり、従来の 100 倍以上の精度が要求される。
- (2) 欠陥は単にクラックばかりでなく、介在物、接触部の検出、評価が必要とされる。
- (3) 一般に被検体が小さく厚さも薄い。
- (4) 扱う材料も各種金属、セラミックス、樹脂、複合材など多様で音響特性も大幅に異なる。

などである。これらの測定条件を満足させるためには、以下に述べるような精度の良い、解析機能のすぐれた装置が必要になる。図2に実験装置の構成を示す。この装置は水浸法による超音波探査を目的としており、XYZ スキャナを自動制御することにより、測定位置を自由に変更できる。検出対象の欠陥が小さいため、微小ピッチで移動しながら超音波の送受信を行う必要があり、各方向共走査ピッチ $10\mu\text{m}$ のスキャナを使用している。超音波探触子は上下方向（Z 方向）に移動するスキャナに取り付けられ、容易に位置合せができる。本装置では所定ゲート内の信号のピーク値を検出し、これを A-D 変換によりコンピュータのメモリに記憶することにした。すなわち Z を一定にし XY スキャナを操作しながら一定間隔ごとにデータをサンプリングし記憶すれば被検体の所定深さにおける超音波エコー情報が集まる。こ

図2 実験装置の構成

図 3 接着はく離における超音波エコーモデル

のエコーレベルを輝度レベルに置き換えてモニタテレビジョン上に表示すれば, 一断面の超音波による擬似画像が得られる。これは上記のCスコープに相当する。この画像から輝度の相違を利用して欠陥を検出することができる。表示装置は256階調の輝度レベルのものを採用した。これは階調が少ないと微小な欠陥からの小信号を見落してしまうからである。なお解析結果は8階調でカラーディスプレイに表示できる。コンピュータにより欠陥サイズの検出, エコーレベル頻度分布, 二値化, 画像の強調などの処理が行われる。これらの画像はカメラまたはカラーハードコピーで記録することができる。またフロッピディスク装置により記録し保存できるためいつでも画像の再生処理が行える。なお本システムにはビデオ信号入力端子が設けてあり, 画像処理機能を利用して他の検査法と複合した処理が行えるのも一つの特徴である。セラミックスなどの強度評価には材料に関する種々の特性を知る必要がある。波形記憶機能を付加すれば, 材料の音波が測定できるため弾性係数, ポアソン比, 体積弾性係数, 密度などの強度評価に必要な各種情報を得ることができる。また高速フーリエ変換により周波数領域における種々の特性解析を行うこともできる。これは厚さの測定や欠陥形状の測定などに有効である。

4. 電子部品, 新素材の測定結果

次にいくつかの測定結果を示す。特にことわりがない場合には25 MHzの探触子を使っている。式(1)に示したように, 境界層においては構成部

(a) (-) ピーク値による音響像

(b) (+) ピーク値による音響像

(c) はく離部の音響像

図 4 差分法による接着, はく離の検出

材の音響インピーダンスにより, 反射特性が異なる。例えば半導体パッケージ内のシリコンチップ上面の接合状態を考えた時, 樹脂とシリコンの接合界面では $Z_1 < Z_2$, はく離欠陥部では樹脂と空気であり $Z_1 > Z_2$ となり, 反射率 R の符号が異なる。これは入射波と反射波の位相が異なることを示している。すなわち, はく離部では位相が反転することになる。ここで接着・はく離における超音波エコーモデルを使って接合状態の詳細を検討してみる。図3は樹脂と金属または空気層の境界における反射モデルである。接着部のエコーは(a)に見られるごとく, (+) 側が大きく, はく離の割合が多くなると減少していく。逆に はく離部エコーは(b)のごとく (-) が増大していく。測定装置で観察されるエコーは(c)のように(a), (b)の合成されたものである。これは (-) ピークと (+) ピーク値の関係より接着・はく離の状態が判別できることを示している。この特性を利用して実際に半導体パッケージ内の接合部を検査してみる。図4は64 k DRAM 内部の超音波探査像を示す。この図はシリコンチップとリードフレーム上

図 5 超音波によるすきま検出能力の検証

面に焦点を合せて測定した結果を合成したものである。(a)は(−)ピーク値を検出して得られた音響像であり、はく離に関する信号のレベルが高い。(b)は(+)ピーク値による音響像である。この場合は接着のよいものが高い信号レベルを示す。この両図より明らかであるが、いずれか一方だけでは接着かはく離か判定できない。(c)は両図の差分を取り、はく離部のみを抽出したものである。すなわち(−)ピーク値が(+)ピーク値より大きい場合をはく離と判定したものである。注意しておく必要があるのは、エコーレベルが高いものが必ずしもはく離を示していないことである。樹脂と良く接合した金属部からの反射率も高いからである。それでは一体どの程度のすきまがあれば超音波で検出が可能か検討してみる。図5は1枚の平行平面ガラスと1枚の平凸レンズ(半径1000 mm)を接触させ可変すきまを作ったすきま測定用モデルを示す。すきまの検定は緑色光によるニュートンリングにより行った。この結果零次の暗リングの径は約1.33 mm、すきまは $0.13\mu\text{m}$ が得られた。一方、25 MHzの焦点形探触子を用いた測定結果を見ると、超音波の反射が減少し始める時の径は1.08 mmであり、ニュートンリングの零次の明リング内に存在していることが分る。すなわち少なくとも $0.13\mu\text{m}$ 以上のすきまでは超音波は全反射している。この結果から超音波が優れたすきま検出能力を持っていることが分かる。ここで参考のため通常の軟X線と超音波による探傷の比較を行って見る。図6は半導体

図 6 X線と超音波による信号強度の比較

図 7 ドリル穴の超音波映像

樹脂パッケージ内部のチップ上のはく離を検出したものである。X線でははく離は検出されていない。これに対して超音波では接着・はく離部がめいりように区別できる。図の白い領域がはく離を示している。図に引かれたラインに沿った信号レベル分布を詳細に調べてもX線では何の変化も認められない。

次に新素材の欠陥検出例としてセラミックスの測定結果を示す。セラミックスは本質的に脆性であり内在する欠陥の検出は強度評価の上で非常に重要である。図7はマシナブルセラミックス試片に一系列に開けた未貫通ドリル穴を探索した例である。素材の厚さは2 mmで上面側から超音波を入射し穴の開いている底面側に焦点を合わせ測定したものである。(a)は測定のままの音響像、(b)は小径ドリル穴部を画像処理で強調したものであ

(a) 全体探査像

(b) 拡大探査像

図 8 タングステンワイヤの音響像

る。強調することにより $40\mu\text{m}$ 径のドリル穴がめいりように検出できていることが分かる。ドリル穴の他に四つの黒点が認められるがこれは素材に存在していた自然欠陥の影である。図 8 は厚さ 3mm の焼結炭化けい素の上から 1.5mm 下に埋めこんだ $10\sim 500\mu\text{m}$ 径のタングステン線を 50MHz の探触子で検出した例である。すべてのタングステン線が検出されている。ウインドで囲まれた径 $10\mu\text{m}$ の部分を詳細走査後強調処理した結果を図 8 (b) に示す。 $10\mu\text{m}$ のタングステン線がめいりように検出されているが他に多くの自然

図 9 超音波探査映像装置 AT 5000

欠陥が存在していることが分かる。

5. おわりに

以上電子部品や新素材の微小欠陥の検出、接合界面の探査システムを紹介したが、本システムは他に多くの機能を有している。これは製品の品質保証を適切に行うには、非破壊検査は重要であり他の優れた検査方法と複合してより正確に評価すべきものと考えているからである。また解析能力を重視した設計になっているのも欠陥そのものの存在を確認するための装置ではなく、その欠陥が品質評価上どのような特性を持っているかを判断するためである。今後利用技術、ソフトウェアの蓄積をはかり、より信頼性の高い探査技術を確立していきたい。最後に半導体やセラミックスの欠陥検出用に開発された超音波探査映像装置 AT 5000 を図 9 に示す。

文 献

- (1) Mayo, J.S., サイエンス, 16-12 (昭 61), 19.
- (2) 野中, 日立評論, 68-6 (昭 61), 53.

(原稿受付 昭和 62 年 4 月 20 日)