

微小欠陥を映像化して 半導体・電子部品の高信頼化を支える

—超音波映像装置 FineSAT—

北見 薫
Kitami Kaoru

酒井 薫
Sakai Kaoru

富田 隆
Tomita Takashi

黒澤 一吉
Kurosawa Kazuyoshi

株式会社日立パワーソリューションズの超音波映像装置 FineSAT は、半導体をはじめとする電子部品内部のクラックや剥離などを、超音波によって非破壊で検出し、画像化する装置である。検査画像の高分解能化のために、音響レンズを用いて超音波を集束ビーム化して検査対象に照射する。電子部品の小型化に伴い、測定画像のさらなる高分解能化、高精細化が求められている。

これらのニーズに応えるため、検査対象に照射する超音波の高周波成分を強調する装置を組み込むことでさらなる高分解能化を実現し、従来 2.5~4 μm 程度が限界であった検出能を 1~1.6 μm まで向上させた。また、照射する超音波集束ビームの強度分布を考慮してデコンボリューションを行う処理を組み込んだことにより、コントラストを 1.6 倍向上させ、検査画像の高精細化を実現した。

1. はじめに

コンシューマー製品の軽薄短小化に伴い、半導体をはじめとする電子部品の構造やパッケージ形態の複雑化・微細化が進んでいる。これら電子部品内部のクラックや剥離、ボイドを、超音波を用いて非破壊で検出する超音波映像装置 (SAT: Scanning Acoustic Tomograph) は、信頼性確保のために必須であるが、電子部品の小型化に伴い、測定画像の高分解能化・高精細化が求められている。

これらの市場ニーズに応えるため、株式会社日立パワーソリューションズは FineSAT を開発・製造している。2015

年4月には、その第4世代となる FineSAT V を市場投入した (図1参照)。FineSAT は 5~300 MHz 用探触子に対応している。

2. 超音波映像装置 FineSAT の概要

2.1 超音波による欠陥検出の原理

SAT では、媒質内での音の伝わりやすさの指標である音響インピーダンスの違いを利用して欠陥を画像化する。図2に示すように、媒質1と媒質2が積層された被検体に超音波を照射すると、その界面で反射と透過が起こる。その際の反射波強度 (R) は、式 (1) で表される。



図1 | 超音波映像装置 FineSAT V

超音波映像装置 [SAT (Scanning Acoustic Tomograph)] FineSAT V (オプション装備状態) の外観を示す。

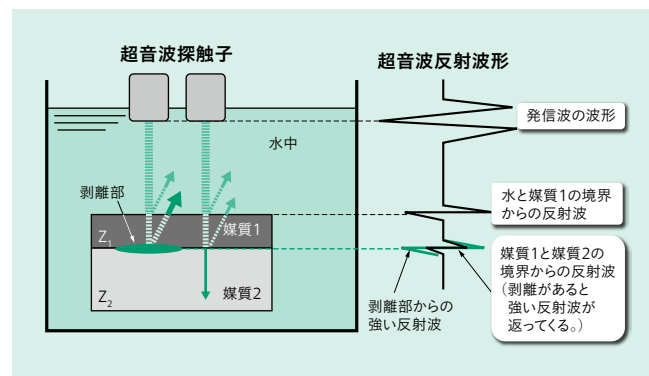


図2 | 超音波による欠陥検出の原理図

媒質1と媒質2の境界の反射波強度の違いを濃淡表示することにより画像化する。

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

ここで、 Z_1 、 Z_2 はそれぞれ媒質1、2の音響インピーダンス、 I は入射波強度である。SATでは超音波を高速走査しながら、各点での超音波の反射波強度または透過波強度をグレースケールの濃淡で階調表示することによって測定画像を得る。また、反射波および透過波を用いる測定方法を、それぞれ反射法、透過法と呼ぶ。

音響インピーダンスは、固体、液体、気体の順に小さくなり、気体は固体に対して3桁以上小さい。この大きな音響インピーダンスの違いに由来して、剥離やボイドでは入射波のほぼ100%が反射されるため、反射法画像では周囲と比べて大きなコントラストが得られ、欠陥検出が容易となる。剥離は深さ方向に5 nmの空隙があると検出可能とされている¹⁾。

2.2 探触子の分解能

圧電素子を用いて電気信号を機械振動に変換、またはその逆変換することで超音波を送受信するデバイスが探触子である。電子部品の検査においては高分解能を要求されるため、探触子は先端に音響レンズを備え、集束ビームを被検体に照射する。水中でのビームスポットサイズ径 d_{-6} は、 F は焦点距離、 D は音響レンズの開口径を用いて、式(2)で表される。

$$d_{-6} = \alpha \frac{\lambda F}{D} \quad (2)$$

ここで、 α は係数、 λ は水中での超音波の波長で、水中の音速 v と超音波の周波数 f を用いて、式(3)で表される。

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (3)$$

なお、探触子から発せられる超音波は、単一周波数ではなく、特定の周波数でピークとなるような帯域を持っている。その場合には f はピーク周波数で考える。

式(2)から、探触子の分解能を向上させるためには、短波長化(すなわち高周波化)、短焦点化、大口径化の3種類の方法があることが分かる。このうち、短焦点化と大口径化は、実際の非破壊検査では有効とならない場合がある。大口径化については、水中から被検体内部に超音波が伝搬する過程でスネルの法則に従った屈折が起こる。これにより、大口径化をしても実際に被検体内部に侵入するのは、レンズの中央部分から発せられた超音波のみとなる。また、短焦点化は表面近くの欠陥にしか適用できない。このため、高分解能・高精細測定には周波数が最も重要な要素である。

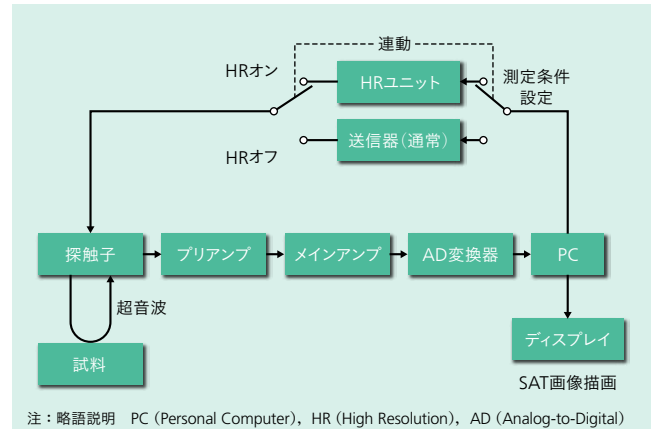


図3 | HRユニットをオプション接続した場合のFineSATのブロックダイヤグラム

HRユニットは、探触子から発せられる超音波の周波数成分を狭帯域化して高周波側にシフトさせる機能を有する。

3. 高分解能化技術

3.1 高分解能化の原理

前章で示したように、高分解能化には高周波化が重要である。そこで、日立パワーソリューションズは、探触子から発せられる超音波の周波数成分を狭帯域化して高周波側にシフトさせる高分解能ユニット [HR (High Resolution) ユニット] を開発し、FineSATにオプションで接続できるようにした。HRユニットを接続した場合のブロックダイヤグラムを図3に示す。HRユニットを接続した場合のFineSATでは、通常を送信器と、高分解能測定を行うためのHRユニットを備え、測定条件設定を行うPC (Personal Computer) から、どちらか一方へ切り替える構成となっている。

公称周波数250 MHz、焦点距離2.9 mmの探触子を用いて、FC/CSP (Flip Chip/Chip Scale Package) LSI (Large-scale Integration) のSiチップとアンダーフィル樹脂の界面の同一地点から得た反射波信号を高速フーリエ変換 (FFT: Fast Fourier Transform) したものを図4に示す。HRユニット不使用の場合 [同図 (a)] に対し、HRユニットを使用した場合 [同図 (b)] ではピーク周波数が223 MHzから281 MHzにシフトした。

3.2 高分解能化技術の適用効果

HRユニットの評価で使用したSi貼り合わせ試料の断面構造を図5に示す。Siウェーハに深さ170 nm、幅1~300 μmの溝を形成し、上からSiを貼り合わせたものである。Si貼り合わせ試料を測定中に通常を送信器から、HRユニットに切り替えて測定したSAT画像を図6に示す。使用した探触子は、公称周波数250 MHz、焦点距離は1.2 mmであり、貼り合わせ界面に焦点を合わせた。HRユニットにより、ノイズに対する信号強度の比が向上し、接合部と

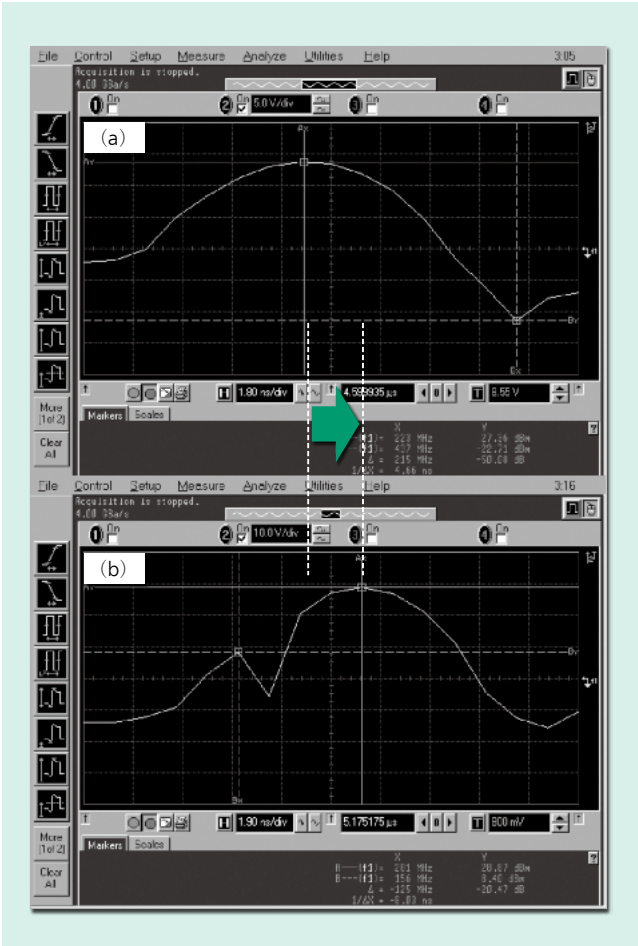


図4 | HRユニットによる送信超音波の狭帯域化・高周波化

公称周波数250 MHz, 焦点距離2.9 mmの探触子を用いてFC/CSP (Flip Chip/Chip Scale Package) LSI (Large-scale Integration) のSiチップとアンダーフィル樹脂の界面の同一地点から得た反射波信号を高速フーリエ変換 (FFT: Fast Fourier Transform) したスペクトルを示す。(a) はHRユニットがオフの場合、(b) はHRユニットがオンの場合である。

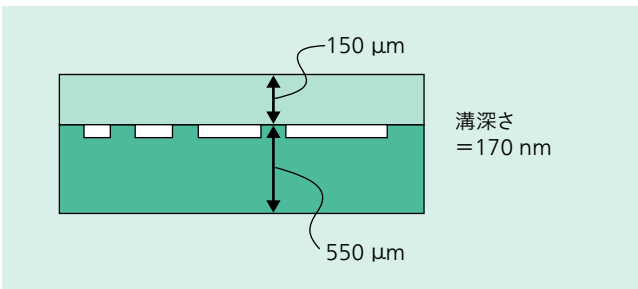


図5 | Si貼り合わせダミーサンプルの断面構造

Siウェーハ上に深さ170 nm, 幅1~300 μmの溝を形成し, 上から別のSiウェーハと張り合わせて作製した。

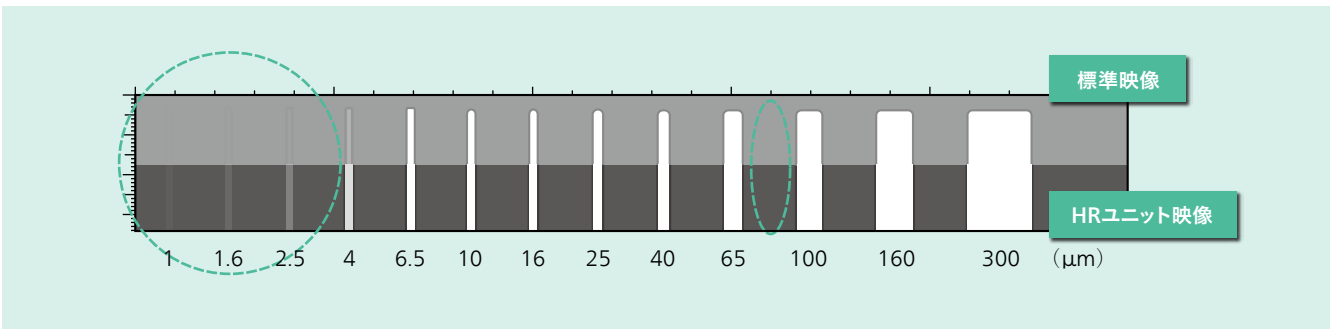


図6 | HRユニットによる検出能向上

公称周波数250 MHz, 焦点距離1.2 mmの探触子を用いたSi貼り合わせ試料の観察例を示す。途中で通常測定からHRユニットを使用した測定に切り替えた。上半分が通常測定の結果, 下半分がHRユニットを使用した測定結果である。

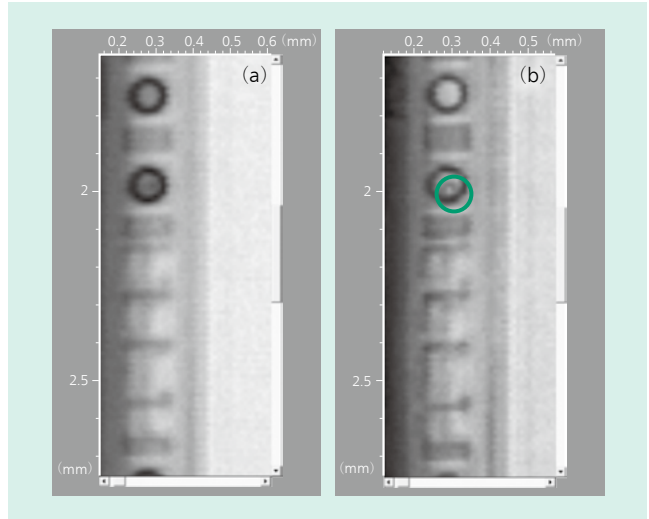


図7 | HRユニットによる実際のサンプル上での検出能向上

公称周波数250 MHz, 焦点距離2.9 mmの探触子を用いてFC/CSP LSIのSiチップとアンダーフィル樹脂の界面を観察した結果例を示す。(a) は通常測定の場合、(b) はHRユニットを使用した場合である。

非接合部のコントラストが改善した (楕円丸囲み部)。そのため、HRユニット不使用時にはほとんど検出できなかった2.5 μm以下の溝を、HRユニットを使用することによって検出できた (正円丸囲み部)。ただし、4 μm以下の溝に関しては、超音波のビームスポット径よりも小さいため、すべて同じ幅に見える。

図4の条件でFC/CSP LSIのSiチップとアンダーフィル樹脂の界面を観察したときのSAT画像を図7に示す。HRユニットを使用した同図 (b) では、HRユニット不使用の場合 [同図 (a)] に比べて微細な欠陥が検出できている (丸囲み部)。

4. 画像鮮鋭化技術

4.1 画像鮮鋭化の原理

高精細画像の取得は、式 (2) で示されるビームスポット径を小さくすることによって達成される。しかし、ビームスポット径を小さくしても、超音波が径方向に強度分布を持つことに由来して、SAT画像に表示されるパターンの

輪郭部はぼんやりする。このぼけは、小さな欠陥を見逃す原因となる。そこで、日立パワーソリューションズは、SAT画像から画像処理によってこのぼけを取り除く画像鮮鋭化技術をFineSATのオプション機能として開発した。

SAT画像 $O(x, y)$ は、次式によってモデル化できる²⁾。

$$O(x, y) = G(x, y) \otimes X(x, y) + N(x, y) \quad (4)$$

ここで、 x, y は画像上の座標であり、 $X(x, y)$ は本来得られるべき理想画像、 $N(x, y)$ はノイズであり、 \otimes は位置に関するコンボリューションを行う演算子である。 $G(x, y)$ はぼけの要因となるビームスポットにおける超音波強度分布 (PSF: Point Spread Function) であり、画像取得に使われた探触子の仕様から式(2)に従い、ビームスポット径 d_{-6} を算出し、式(5)に示すガウス分布で近似する。

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi d_{-6}^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2d_{-6}^2}\right) \quad (5)$$

ぼけを取り除いた理想画像 $X(x, y)$ は、SAT画像 $O(x, y)$ からノイズ $N(x, y)$ を除去し、PSFを基にデコンボリューションを行う³⁾ことによって得られる。

4.2 画像鮮鋭化技術の適用効果

公称周波数200 MHz、焦点距離6.9 mmの探触子を用いてFC/CSP LSIのSiチップとアンダーフィル樹脂の界面を観察したときのSAT画像に対して、画像鮮鋭化技術によって得た復元画像を図8(a), (b)に示す。同図(c), (d)は、同図(a), (b)上のA-B間の信号強度分布を示す。SAT画像上[同図(a)]の円形の形状は、はんだバンプを示している。同図(a)において欠陥と表示してある部分が他のバンプと比較してやや明るく見えているが、これはクラックのあるバンプを示している。同図(c)に示すように、背景信号強度と同程度であるため、これを欠陥と見分けること

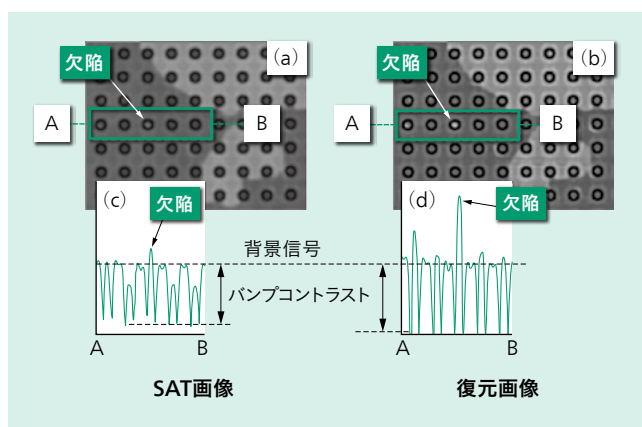


図8 | 画像鮮鋭化技術による欠陥の顕在化

公称周波数200 MHz、焦点距離6.9 mmの探触子を用いてFC/CSP LSIのSiチップとアンダーフィル樹脂の界面を観察した結果に対して画像鮮鋭化技術を適用した効果例を示す。(a)は画像鮮鋭化前のSAT画像、(b)は画像鮮鋭化後の復元画像、(c)は画像鮮鋭化前のSAT画像上のA-B間の信号強度分布、(d)は画像鮮鋭化後の復元画像上のA-B間の信号強度分布である。

は難しい。一方、同図(b)に示すように、画像鮮鋭化による復元画像では背景画像に比べて明らかな輝点として確認することができた。同図(c), (d)から、背景信号強度は同じであるが、欠陥の信号強度は1.6倍となることが分かった。

5. おわりに

ここでは、日立パワーソリューションズの超音波映像装置FineSATの概要と、そこで用いられている高分解能化技術と画像鮮鋭化技術について述べた。これらの技術により、従来技術では検出が難しかった欠陥の検出性を向上した。

今後も被検体である電子部品の小型化、多層化、複雑化は進展していくと予測される。日立パワーソリューションズは、検出が難しくなる一方の欠陥を、確実に捉え、見逃さないようにするため、FineSATのハードウェア、ソフトウェアの改善、新技術の開発を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 山本, 外: 実装プロセス開発を加速する超音波映像装置, 日立評論, 91, 5, 468-471 (2009.5)
- 2) K. Sakai, et al.: Image improvement using image processing for scanning acoustic tomograph images, Proc., 22nd IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits, 9-4 (2015)
- 3) L.B. Lucy: An iterative technique for the rectification of observed distributions, Astronomical Journal, vol. 79, pp. 745-754 (1974)

執筆者紹介



北見 薫

株式会社日立パワーソリューションズ
産業機器・エンジニアリング事業統括本部
コンサルティングエンジニアリング本部 ファインテック開発センター
所属
現在、超音波映像装置の開発・設計に従事
日本非破壊検査協会会員



酒井 薫

日立製作所 研究開発グループ 生産イノベーションセンター
検査・計測研究部 所属
現在、検査・計測に関する信号処理の研究に従事
精密工学会会員



富田 隆

株式会社日立パワーソリューションズ
産業機器・エンジニアリング事業統括本部
コンサルティングエンジニアリング本部 ファインテック開発センター
所属
現在、超音波映像装置の開発・設計に従事



黒澤 一吉

株式会社日立パワーソリューションズ
産業機器・エンジニアリング事業統括本部
コンサルティングエンジニアリング本部 ファインテック開発センター
所属
現在、超音波映像装置の開発・設計に従事