画像処理による半導体集積回路内部 ボンディングワイヤ検査*

青木公也** 金子豊久*** 杉浦史晃† 野々山明男† 玉木清英†† 宇田良美†††

Inspection of Internal Bonding Wire of Semiconductor Integrated Circuit by Image Processing

Kimiya AOKI, Toyohisa KANEKO, Fumiaki SUGIURA,
Akio NONOYAMA, Kiyohide TAMAKI and Yoshimi UDA

In this study, a construction of an automatic inspection system of X-ray images was tried. Images used in this study are acquired by a X-ray inspection for internal bonding wires of semiconductor integrated circuits. From a quality control point of view, a nondestructive inspection of complete parts such as solder balls, socket pins, bonding wires and so on, is very important. However, because of improvements of semiconductor integrated circuits, a visual inspection by using X-ray images becomes increasingly harder. In this study, the bonding wire inspection is particularly discussed. The wire is thin compared to a general inspection resolution and overlaps to other elements. In some case, the wire becomes deformed and breaks. Consequently, it is necessary for the automatic inspection system of the bonding wire to propose a specific image processing. As the result of the investigation by experiments using actual X-ray images, it was confirmed that the system constructed was effective to the inspection of the bonding wire.

Key words: Bonding wire, Automatic inspection, X-ray image, Line detection, Image processing

1. 序 論

半導体集積回路の製造において、半田ボールやピン、ボンディングワイヤ等の非破壊検査は品質管理の上で重要である。しかし、近年の集積度の向上により、X線透過画像を用いた目視検査は限界に近づいている。本研究では特に、半導体集積回路内部のボンディングワイヤ検査の自動化を試みる。

半導体集積回路の画像処理による検査手法として、例えばワークの位置合わせ¹⁾²⁾やソケットピンのピッチや長さの計測³⁾、BGAパッケージの半田ボール検査⁴⁾⁵⁾等の報告がある。これらの検査対象は製品の品質においては当然重要な項目である。しかし、これらの検査対象は透過画像や外観画像中において比較的明瞭であったり、他の背景パターンとは元々分離して撮像される箇所であり、画像処理による自動化は比較的容易であると言える。一方、ボンディングワイヤは、チップとリードフレームの端子間を結線した金属線であり、半導体パッケージ内で3次元的に配線される。従って、透過画像中では基板のプリントパターン等に重なって撮像される。また、ワイヤ外径は25 μm 程度であり、一般的な検査解像度に比べて細く、かつ変形や切断を伴う場合があり、従来の画像処理手法の組み合わせではその自動検出は困難であると言える。ワイヤの流れや変形、切断は主に樹脂封止時に発生し、ワイヤの細線化に伴って最も品質管理すべき項目の一つである⁶⁾。

そこで、本研究では画像中の線要素を検出するための新たな画像処理手法を提案する。また、ワイヤの変形や切断、流れ

等を定量的に判定することが可能な検査ガイドラインを提案し、X線透過画像中のボンディングワイヤに対して、検出から評価までを自動的に行うことが可能なシステムを構築する。

2. アプローチ

図1(a)に検査画像の一例を示す。また、図1(b)は、(a)中の長方形枠内の拡大図である。本研究で対象とするワークは単層の半導体パッケージであり、検査画像は上面方向からのX線透過画像とする。画像はグレースケール8bitで解像度は17 μm /画素、サイズは640 $\times$ 480画素である。原画像中にはワイヤ像以外にもパターン像が存在する。また、X線画像の特性上、画像全体に渡って粒子状ノイズと大域的な輝度ムラが存在する。さらに、解像度がワイヤ径の0.7倍程度であり、入力画像中でワイヤ幅は2~3画素にしか撮像されない。従って、画像処理対象としての難度は高く、基本的な画像処理手法の組み合わせのみでは、ワイヤを検出することは困難である。また、ワイヤの切断や流れ、間隔等の状態を精密に検査するには、ワイヤ一本一本を個別に認識する必要がある。

以上より本研究では大きく分けて二つの画像処理手法を提案し、それらを組み合わせることによって自動検査を行う。一つは、線構成要素の抽出法である。ワイヤは図形としては周囲より低輝度値の曲線である。提案手法では、ワイヤ以外のパターンの検出は抑制し、設定した幅以下の線構成要素を検出することができる。二つ目はワイヤの認識手法である。ワイヤ認識処理はさらにワイヤ端点検出と、ワイヤ検査ガイドライン設定の二つの処理に分けることができる。まず、ワイヤ取り付け工程における初めの接合点(ワイヤの一方の端点)であるファーストボンディング(以降FB)を検出する。次に、FB点から伸展する線構成要素を追跡することにより各ワイヤを認識する。提案手法ではワイヤが切断したり蛇行している

* 原稿受付 平成15年6月11日

** 正会員 豊橋技術科学大学(愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

*** 豊橋技術科学大学

† アライドシステム(株)(愛知県知立市谷田町本林2-14-10)

†† 東芝ITコントロールシステム(株)(東京都府中市東芝町1)

††† 豊田通商(株)(東京都中央区日本橋2-14-9)

Fig. 1 Input image of wire inspection

Fig. 2 System flow

場合もワイヤ曲線を線分集合として検出できる。本研究ではこれをワイヤ検査ガイドラインと呼び、このガイドラインを用いて各検査項目を達成する。

3. 提案手法

3.1 システムの構成

図2に提案する検査システムの全体図を示す。検査処理では次々に入力される透視画像に対して自動的にワイヤ検出、検査を行い結果を出力する。提案する画像処理手法ではワーク毎にFB点群の相対位置と、各FB点に対応するセカンドボンディング（以後SB）点の相対位置情報が既知であるとした。従って、新たなワークを検査するに先立って、作業員は、良品サンプル画像中からそれらの位置情報を専用のGUIアプリケーションを用い、一度だけ目視によって検出しておく（図2(1)）。また、検査処理では対象ワークに適した各種パラメータを設定しておく必要があるが、システムは(1)で得られた情報から適切なパラメータ値を自動的に設定する（図2(2)）。以降、図2(3)~(6)の画像処理手法について詳細を説明し、最後にパラメータ設定（図2(2)）について説明する。

3.2 線構成画素の検出（図2(3)）

図3(b), (c), (d)に図1(b)(または図3(a))中の各走査ライン上(A, B, C)の輝度分布グラフを示す。グラフより、入力画像には大域的なムラや、基板パターンによる輝度変化が存在し、固定しきい値による2値化手法では、ワイヤのみを適切に検出することが困難であることが分かる。この場合、一般的には可変しきい値法⁷⁾等が用いられるが、本研究では一定幅の線領域が検出対象であることから、線の画像的特性に

Fig. 3 Brightness distribution

着目した手法を提案する。

前述の図3(b), (c), (d)のグラフより、ワイヤ線に交差する輝度分布では、ワイヤ線部の輝度値が局所的に落ち込んでいることが分かる。そこで、線が無かった場合の輝度分布を推定し、それを元の輝度分布から差し引くことにより線を検出する。図4に模式図を示す。ここで重要なのは図4(b)の輝度分布（画素値）の推定法であるが、本研究では注目画素を中心に左右 S_α 画素の領域における中央値を用いた⁸⁾。線を構成する低輝度値の画素は、低輝度値側から $S_\alpha + 1$ 番目の中央値未満となるため、理想的には、幅 S_α 画素以下の線は補間され、検出される。従って、 S_α をワイヤ幅（2~3画素）に設定することによって、ワイヤのみが検出され、それより幅の広いリードフレーム等は検出されない。また、中央値を用いることによって、はずれ値の影響が抑制される。

実際にはワイヤの伸展方向は様々であるため、図4(d)に示すように、注目画素を中心に 0° から 180° まで S_β おきに線状窓を回転させる。従って一つの注目画素について $180/S_\beta$ 個の中央値が算出されるが、その最大値を補間輝度値とする。図5に図1(b)から線構成画素を検出した結果を示す。この図では検出後の画像に対して輝度の落ち込み量が $S_\gamma = 5$ 以上の画素を黒で示した。このように、検出後の画像は線の輝度データを保持しており、輝度値による選択的な線の検出が可能である。図5中にはワイヤ線以外にも多数のノイズ要素が検出されている。 S_γ を調整することによってノイズ要素の検出は抑制できるが、次段階のワイヤ検査ガイドラインの設定はノイズに対してロバストであるため、ここでは過抽出側に設定すればよい。なお、図5では、パラメータ S_α は2画素に、パラメータ S_β は 45° に設定した。

3.3 ファーストボンディング (FB) 点の検出（図2(4)）

図1(a)をしきい値100で2値化した結果を図6(a)に示す。この図より、FB点は面積こそ小さいが、比較的輝度値が低く、単一のしきい値でも検出できることが分かる。そこで、線構成画像中からワイヤ曲線を個別に認識するに当たり、まず全

てのFB点を認識番号を付加しつつ検出する。ただし、ワークの検査トレーへの設置や撮像の位置決め精度に依存して、入力画像中でのFB点群の位置は変化する。

対象ワーク毎に、FB点の個数と相対的な位置関係は前処理で教示されている(図2(1))。教示の際、FB点群をいくつかのグループに分割し、各集合にそれらを内包する探索窓を設定する(図6(b))。実際の検査では、それらの相対的な位置関係を固定したまま原画像中を走査する(図6(c))ことによって、FB点群を検出する。ある走査位置において各探索窓内をしきい値 T で2値化する。ラベリング処理によって各探索窓内のラベル数を算出する。このラベル数を探索窓内のFB点の個数と考えれば、全ての探索窓中のラベル数が規定値の時、FB点群の検出が完了したことになる。初期しきい値によって検出されなかった場合はしきい値を再設定し、同様にして検出処理を行うことによって、全体の輝度レベルが異なる画像においても自動的に検出される。本手法の特長は、複数の探索窓領域を設定し、それらの位置関係を考慮することにより、ロバストにFB点検出できることである。各々のFB点の接合時の位置ズレや、撮像時のワークの回転等は探索窓のサイズ内において保障される。初期しきい値 T については前処理(図2(2))によって設定される。

検出されたFB点領域は各々ある面積を持っているが、ワイヤ追跡の開始点は、検出領域中最も近傍領域平均輝度値が低い画素とする。図7に図1(b)からFB点を検出した結果を示す。図では検出されたFB点の位置から、教示されたSB点の相対位置情報を用い、検査画像においてSB点が存在しているであろう位置に○印を示している。各FB点とSB点のセットには認証番号が付加されている。

3.4 ワイヤ検査ガイドラインの設定(図2(5))

線構成画像では線要素を局所的な情報から検出しているため、ノイズも多数検出される。また、ワイヤが切断している場合は、当然その間の線構成画素は存在しない。そこで、より大域的な検索によってロバストなワイヤ追跡を行う。

図8にアルゴリズムの模式図を示す。長さ L の線分を、片側の端点をFB点位置に設置し回転させる。その際、各角度において、その方向に線が伸展する確度を次式により求める。

$$Accuracy = E/N \quad (1)$$

ここで、 N は線分を中心に距離 W の範囲に含まれる画素数、 E はその範囲内の線構成画素(図8(b)における黒画素)の個数である。 W は検出線の幅より設定する。この確度が最も高い方向にワイヤが伸展していると考え、得られた線分の終点を中心に、同様の処理を規定回数繰り返すことによって、ワイヤを終点まで検出する。1回目の回転範囲 A_1 は教示されたSB点方向を中心とし、2回目以降では線分の回転範囲を前回の線分方向を中心に左右 A_2 とする。以上の処理で得られた線分群はあくまでワイヤ曲線の近似である。そこで、本システムではこれをワイヤ検査ガイドラインと呼び、これを用いて各種検査項目を測定する。

本処理の特長は、線構成画像の段階では途切れ途切れで検出されていたワイヤ線も、一本の曲線として検出できること、線分単位での探索によりノイズ(ワイヤ以外の線要素)に対してもロバストであることである。また、ハフ変換や曲線モデルによる手法⁷⁾では検出が困難な蛇行したワイヤの検出も、線分長 L と線分の回転範囲 A_1, A_2 によって近似可能な曲率の小さい、緩やかな蛇行であれば「蛇行ワイヤ」として検出できる(4.で例を示す)。逆に、激しく蛇行する場合においては、

Fig. 8 Inspection guide line

Fig. 9 Set wire inspection guide lines

蛇行の振幅が確度計算における幅 W 内であれば、蛇行しながらのワイヤ伸展方向を適切に求めることができる。図 9 に図 1(b) に対してワイヤ検査ガイドラインを設定した結果を示す。なお、本研究では $W = 2 \sim 4$ 画素、 $A_1 = A_2 = 60^\circ$ に設定した。初期の L と繰り返し回数についてはワイヤ毎に、予め前処理 (図 2(2)) によって設定される。

3.5 ワイヤ検査 (図 2(6))

半導体内部のボンディングワイヤに関しては、(1) ワイヤの変形、(2) ワイヤの間の距離、(3) ワイヤ流れ、(4) ワイヤの切断の 4 項目を検査する必要がある。各測定項目の模式図を図 10 に示す。

3.5.1 ワイヤの変形

図 11(a) に変形評価の模式図を示す。検査ガイドラインのセクション毎の振れ角度を左右それぞれで積算することにより、左右への変形、蛇行を判定する。

3.5.2 ワイヤ間の距離

図 11(b) にワイヤ間距離評価の模式図を示す。検査ガイドラインのセクション毎にその中点を求め、その中点と隣接ワイヤのガイドラインとの距離をワイヤ間距離とした。測定結果は厳密には近似値であるが、セクション毎にワイヤ間距離を評価できる。

3.5.3 ワイヤ流れ

図 11(c) にワイヤ流れ、すなわち流れ率評価の模式図を示す。FB 点と SB 点間の距離はガイドラインの先端と終端間の距離とする。 H_w は FB 点と SB 点を通過する直線と、ガイドラインのセクション端点との最大距離とする。

3.5.4 ワイヤの切断

図 12 に切断検査の模式図を示す。検査ガイドラインのセクション毎に入力画像を切り出し、アフィン変換することにより、ワイヤを直線状の画像として再構成する (図 12(b))。この画像においてワイヤに直交方向の輝度分布を調べ、輝度の落ち込み度を測定することによって切断箇所を検出する。切断部では、輝度分布に局所的な落ち込みが見られない。

3.5.5 ワイヤ評価の流れ

ワイヤ検査における評価の流れを図 13 に示す。FB 点の検

Fig. 10 Inspection items

Fig. 11 Measurement 1

出は前述の通りロバストな手法であるが、例えば全く規定外の位置にボンディングされたり、ワイヤが切断し、それが他のボンディング位置に重なるような場合、アルゴリズム上検出は不可能となる。逆に言えば、数回のしきい値調整の結果、FB 点群の検出が達成されない場合は、上記に類する欠陥が存在する可能性が高い。従って、FB 点群の検出が達成されない場合は、そのワークを NG 判定とする。

各ワイヤにおけるガイドラインの設定が達成されたか否かは、ガイドラインの終端位置と教示データから求められる。FB 点に対する SB 点の相対位置と終端位置の距離がしきい値 D 以内か否かで判定する。本研究ではしきい値 $D = 3$ 画素とした。終点が SB 点から遠い場合はワイヤに深刻な欠陥が存在している可能性が高い。例えば、切断によってワイヤ終端が規定とは全く異なる位置にある場合、極端な蛇行によってワイヤ長が規定値より伸びている場合、隣接ワイヤと交差している場合等が考えられる。従って、ワイヤ検査ガイドラインが適切に設定されないワイヤについては NG 判定とする。

ワイヤ検査ガイドラインまでの設定が成功した場合は 4 項目の検査を行う。切断は NG 判定、それ以外は数値データとして結果が出力されるが、これらはユーザが設定する許容値を超える場合 NG 判定とする。

3.6 しきい値、パラメータの設定 (図 2(2))

本システムでは前処理によってパラメータが設定される。図 13 では判定の流れを示したが、教示に用いるサンプル画像は良品ワークであるので、これを入力とした場合は良品判定まで処理が進む必要がある。従って、各種パラメータは画像処理が最終段階まで進めば適切であると考えられる。FB 点検出におけるしきい値 T は、設定された全ての探索窓内において検出される連結要素が規定数となる値とする。また、ワイヤ検査ガイドラインの探索線分長 L とセクションの繰り返し回数は、ワイヤ毎に適切に設定される必要がある。具体的には、

Fig. 12 Measurement 2 (Breaking of wire)

Fig. 13 Inspection flow

まず、教示されたFB点とSB点間距離を初期線分長で除算して繰り返し回数を決定し、ワイヤ追跡を行う。この際求められた終点と教示SB点との距離誤差が線分長より小さい場合は、距離誤差を繰り返し回数で除算し、線分長に加算する。逆の場合は、繰り返し回数を1増加する。本研究では、初期の L 長を20画素とした。

4. 実 験

提案手法の有効性を確認するため、図14に示す5種類のICを用いて検査実験を行った。各々一つの良品画像を用いてパラメータ設定を行い、残りのサンプル画像に対して検査した(CPU:Pentium4 2.26GHz)。表1に各サンプル中のワイヤ本数(a)、検査した枚数(b)、総検査ワイヤ数(c)(枚数×ICワイヤ数)、FB点検出の平均検出時間(d)と検出率(e)、FB点が検出された場合のワイヤ検査ガイドライン設定及び検査に要した平均時間(f)、総検査ワイヤ数に対するガイドラインの設定成功率(g)を示す。また、結果の一例を図15に示す。なお、サンプルDの総検査ワイヤ数が用意した枚数に対して少ないのは、後述の通り、FB点検出の段階でNG判定となった入力枚数が3枚であったためである。また実験では、原画像中(図14、図15)の枠内についてFB点探索を行った。

ICサンプルDについては、FB点群近傍に、チップをリードフレームに固定するための接着樹脂に起因する低輝度の陰影が撮像された入力画像があった。それらの画像についてはFB点群が検出されず、不良判定となった。3.3及び表1の通り、FB点はコントラストが高く概ね安定して検出可能である。しかし、教示されたFB点探索窓内にFB点と同等以上の低輝度領域が存在すると、しきい値 T による2値化によって検出される連結領域数が教示された規定値と一致せず、FB

Fig. 14 Test samples

Table 1 Experiment results

Sample	(a) The number of wires per image	(b) The number of images & (c) Cumulative quantity of wires	Detecting FB point		Setting wire guide line and Screening inspection items	
			(d) Average computation time [msec.]	(e) Average detection rate [%]	(f) Average computation time [msec.]	(g) Average success rate [%]
A	52	9 468	1597	100	57.22	97.6
B	19	9 171	293.2	100	36.56	100
C	74	2 148	500.0	100	133.0	97.3
D	100	5 200	313.0	40.0	125.0	100
E	26	1 26	344.0	100	47.00	100
Total		26 1013				98.5

点群を正しく検出することができない。サンプルD以外の全てのサンプルについてはFB点が良好に検出された。ワイヤ検査ガイドラインの設定については、背景パターンに影響されずに概ね正しく設定された。失敗例としては、SB点への到達線分がわずかにずれているケースであった。FB点検出時間については、画像撮影時の位置決め精度に依存する。また、検査ガイドライン設定時間及び4項目の検査時間は、IC中のワイヤ本数や長さに依存するが、ワイヤ一本につき約1msec.であり、計算時間の面でも実用的であると言える。

次に、蛇行や切断が存在する場合を想定し、実画像を加工してテスト画像を作成し、実験を行った。図16に蛇行、切断の場合の結果の一例を示す。図より蛇行・切断ワイヤの追跡が可能であり、各欠陥の検出に成功していることが分かる。

5. 結 論

本研究では半導体集積回路内部のボンディングワイヤの画像処理による自動検査システムを構築した。検査システムの構築に当たり、主に線要素構成画素の検出法と曲線追跡につ

Fig. 15 Detection results of wire inspection guide lines

Fig. 16 Defect detection

いて新たな画像処理手法を提案した。線要素構成画素の検出では、ワイヤ以外の背景パターンの検出は抑制し、かつワイヤ構成画素を検出することができる。また、曲線追跡では線分状の探索窓を再帰的に回転させることによって、ロバストにワイヤを追跡することが可能である。提案手法では、ワイヤが蛇行・切断している場合でも追跡可能であった。また、相対位置を固定した探索窓を走査することにより、FB点を認証番号付で検出する手法を提案した。このFB点をワイヤ曲線追跡の起点とすることによって、ワイヤ一本一本を認識することができる。さらに、曲線追跡における探索線分をワイヤ検査のガイドラインと定義し、それを用いたワイヤ検査項目

の測定手法についても提案した。

5種類のIC検査画像26枚に対して検査実験を行ったところ、FB点が検出された画像中の1013本のワイヤについて約98%の成功率で追跡できた。さらに、ワイヤ蛇行や切断についてはテスト画像を用いた実験より、それらの検出が可能であることを確認した。作業員による最小限のデータ教示とパラメータの自動設定、検査の各段階における判定の流れについても検討を行い、以上の様に実用性の高い検査システムの構築に成功した。

今度の課題としては、FB点の検出時間の短縮、より多くのワークによる評価実験とそのフィードバック等が挙げられる。また、本システムでは単層の半導体パッケージに対する上面方向からのX線透過画像を入力とした。しかし、複数段の千鳥ボンディングに対しては単一の透過画像ではワイヤが交差して撮像されるため、工業用CTスキャナによる入力を用いた3次元的な画像処理が必要であると考えられる²⁾⁹⁾。

参考文献

- 1) 斉藤文彦: 部分ランダム探索と適応型探索による半導体チップ画像テンプレートマッチング, 精密工学会誌, **61**, 11(1995)1604.
- 2) 谷口慶治編: 画像処理工学 Handbook 応用編 4 章部品・製品の自動検査, 共立出版, (1999)107.
- 3) FEST Project 編修委員会編: 新実践画像処理第4章マシビジョン開発の実践, リンクス出版事業部, 121(2001).
- 4) 渡辺麟太郎, 中前幸治, 藤岡弘: BGAパッケージのはんだボール検査システム, 電子情報通信学会エレクトロニクスソサエティ大会, C-12-8(2000)88.
- 5) 山口博司, 寺本篤司, 伊里年生, 堀場勇夫, 杉江昇: X線画像からのCPSはんだ接続部の抽出, 信学技報, PRMU98-110(1998-10)31.
- 6) 吉原忠史, 幸幹雄, 林田武史, 大野恭秀: ICの樹脂封止におけるワイヤ流れ支配要因, 電子通信学会論文誌, J81-C-II, 4(1998)413.
- 7) 末松良一, 山田宏尚: 画像処理工学, コロナ社, (2000)120.
- 8) 青木公也, 吉田祐樹, 菅泰雄: 背景差分法および領域拡張法によるX線フィルム中の不明瞭溶接欠陥像の抽出, 日本機械学会論文集, 65, 634C(1999-6)401.
- 9) 高堂積, 有田宏志, 大野恭秀: X線CT装置による樹脂封止ICのワイヤ流れ形状計測, 電子情報通信学会, J84-C, 5(2001)400.