連載講座

放射線イメージング技術の最前線 (第3回)

マイクロフォーカス X 線源とその応用[†]

伊藤通浩

浜松ホトニクス株式会社

438-0193 静岡県磐田郡豊岡村下神増 314-5

Key Words : microfocus, radiography, X ray source, electrical parts, semiconductor package, ceramic, 3D image

1. はじめに

X 線を用いた検査は、電子機器をはじめとして新素材、鉄鋼、機械、食品、土木、農林、原子力に至るまで様々な分野で幅広く使われている。

近年、特に半導体産業において、パソコンや携帯電話、PDA (Personal Digital Assistant) などのモバイル機器、車載電子機器あるいは家電製品などの主要部品である LSI (Large Scale Integrated Circuit: 大規模集積回路) は小型化、多機能化による高密度化、高集積化が目覚ましい。これらに対しては厳しい品質管理や信頼性の向上が要求され、その検査解析ニーズに応えるため、微小焦点かつ高拡大可能な MFX 線源が市場に浸透してきた。しかし、市場からの更に高度な要求により、例えば、実装基板における接続不良では位置、形状、状態、欠陥などを立体的に解析する必要があり、また基板も多層化されるとそれぞれの部品を区別して確認する必要があるため、従来からの単なる X 線透過手法では応えられなくなってきた。そこで後

述するように、マイクロ CT, ラミノグラフィ, トモシンセシスなどの技術を用いて 3 次元的な情報を得る装置が普及しつつある。

今回は、筆者らの MFX 線源の紹介とその応用について他社メーカーの情報を含めて最近の動向を述べる。

2. MFX 検査方式の原理

X 線を用いた微小部分の検査には幾何学的拡大の手法を採用している。X 線検査の方式は図 1 に示すように、X 線管焦点から被検査物までの距離 (FOD: Focal spot to Object Distance) と X 線管焦点から検出器までの距離 (FID: Focal spot to Image receptor Distance) との比に

図 1 焦点寸法による画像ボケの比較

[†]The Front of Radiation Imaging Technique (3). Microfocus X-ray Sources and Application. Michihiro Ito: Hamamatsu Photonics K. K., 314-5, Shimokanzo, Toyooka-mura, Iwata-gun, Shizuoka Pref. 438-0193, Japan.

表1 マイクロフォーカス X 線源
(浜松ホトニクス株式会社 製品)

型式	管電圧	最大 管電流 (μ A)	最小 焦点寸法 (μ m)	POD (注) (mm)
	型名			
密封型	80kV L6731	100	8	12
	100kV L7901	250	5	9.5
	130kV L9181	300	5	13
	150kV L8121	500	5	17
開放型	160kV L8321	200	0.4 *	0.5
	160kV L9191	200	1 *	0.5

(注) FOD: 焦点からBe窓出射面までの距離

* チャート検査時

図2 X線発生部構造による拡大率の比較

よって決まる拡大率をもって被検査物の透視画像を得るものである。ここで、MFX線源に要求されるのは、FODの短い管球の提供にある¹⁾。

また、図1に示すように検出器にて得られる透視画像のボケ成分は発生源であるX線管の焦点の大きさに拡大率を掛け合わせた量となって表われる。鮮明な画像を得るためには、焦点が小さいほど良いことになる。焦点寸法の大きいいわゆるミリフォーカスX線管に比べ、より小さな焦点を有するMFX線管が必要とされる理由がここにある。

ちなみに、X線管の構造を見るとミリフォーカスX線管では、フィラメントから放出された熱電子に高電圧を印加してターゲットに衝突させX線を得るといった単純な構造のものが多く。ミリフォーカスX線管に比べると、浜松ホトニクスのMFX線管では電子集束系の追加による高精度な制御を施しており、密封型は静電方式でコンパクト、開放型は電磁方式で高分解能を確保している。

3. MFX線源の紹介

浜松ホトニクスのMFX線源には表1に示すように密封型と開放型がある。ちなみに、開放型は真空排気系を有しており、寿命や条件変更

などに対してターゲット及びカソードが交換可能な構造となっている。

基本的に、開放型は透過型ターゲットで極微小焦点、高拡大率を特長とし、密封型は反射型ターゲットの採用により微小焦点、大出力を特長としている。X線発生部の構造を図2に示した。どちらもX線管ユニットとコントロールユニットによる構成となっていて、X線管ユニットは、高圧電源一体型であることからコンパクトであると同時に高圧ケーブルを配線する煩わしさが無い。

開放型MFX線源は、0.4 μ m (チャート検査) という世界最小の焦点を達成したことから、中日産業技術賞の中日新聞社賞を受賞した。そして2002年のアイソトープ協会講習での発表を経て、今回の掲載に至っている。その外観を図3に、0.4 μ mのチャートを映し出した画像を図4に示した。このチャートは、JIMA (Japan Inspection Instruments Manufacturers' Association: 日本検査機器工業会) が非破壊検査機器メーカーを対象に暫定的に用意したものである。0.4 μ mの線幅が3本、0.4 μ mの間隔で水平、垂直方向に配置されており、画像では明らかに分離されている。開放型MFX線源は、透過型ターゲットの採用により被検査物を

図3 開放型 MFX 線管ユニット外観

図5 密封型 MFX 線源 L9181 外観

JIMAチャート $0.4\mu\text{m}$ (40kV)
 検出器：イメージンシファイアー

図4 開放型 MFX 線源による撮像例

X 線出射窓近傍に設置でき、FOD は X 線出射窓の厚みである 0.5mm となるため高拡大率が得られる。つまり、極微小焦点と高拡大率により、微小な欠陥や異物の検出、形状把握に威力

を発揮するものである。

一方、密封型 MFX 線源には、小型、コンパクトな 80kV タイプ、 100kV タイプ、厚物やヒートシンクを付加したチップなどへの対応可能な 130kV タイプ、 150kV タイプがある。焦点寸法は、 $5\mu\text{m}$ (チャート検査では $2\mu\text{m}$) を達成している。

最近では、X 線源をコンピュータで直接コントロールする市場要求が多い。そこで、制御回路までが一体化したコントローラレスの 130kV タイプ X 線源 L9181 を市場投入し好評を博した。その外観を図5に示した。L9181 は X 線出射部をスリム化し、プリント基板を傾けて検査するのに適した形状とした点も特長の一つである。

4. MFX 線源の応用と技術動向

4.1 半導体関連、CSP/BGA 不良解析

昨今の電子機器は、小型化、軽量化、薄型化に伴い、高密度実装に加えて軽薄短小化へ発展

図6 半導体パッケージの構造

しつつある^{2), 3)}。

当初、プリント基板（これ以降基板と略記する）に挿入してハンダ付けする DIP (Dual Inline Package) などの挿入型から、基板のスルーホールを使用せずに実装できる QFP (Quad Flat Package) などの表面実装型に移り変わった。その後、多ピン化、小型化といった要求により、パッケージ裏面にハンダボールを格子状に配列した BGA (Ball Grid Array) や CSP (Chip Size Package) あるいは Chip Scale Package) などの表面実装型パッケージが普及し、更なる高密度化へ向けて進化し続けている⁴⁾。図6に構造模式図を示した。高密度実装基板の普及、拡大によって、欠陥や異物を検出するだけでなく、ハンダボールの位置ズレ、ブリッジ、ハンダ状態、ボイド状態、ハンダの浮き、マイクロクラック、形状や配置などの評価、解析には立体構造を正確に把握する手法が必須となっている^{5), 6)}。

そこでは、傾斜視方式、マイクロ X 線 CT、ラミノグラフィ、トモシンセシスといった技術が適用されている⁷⁾。

傾斜視方式は、被検査物あるいは X 線源、検出器を傾斜させることで簡易的に奥行き方向の情報を取得するものである。この手法により基板上 IC チップ周辺の BGA とワイヤの様子

正面図

斜視図

図7 BGA 撮像例

を観察した画像を図7に示した。斜視図のように基板を傾けた方が、より立体的に奥行き情報を含んでいることが理解できる。数十 μm の太さのワイヤが1本おきに高さを変えており、またハンダボールの濃色部分は基板との接触面でありムラが見られる場合もある。

マイクロ X 線 CT は、被検査物を回転ステージ上で回転させながら X 線を水平方向から照射し、X 線の透過像をあらゆる角度から取り込んで3次元画像として再構成する方式である⁸⁾。

ラミノグラフィは、X 線源 (X 線焦点) を回転させながら被検査物に斜め方向から X 線を照射し、対向する検出器で同じく回転しながら画像を得る方式であり、両面基板などの場合、

どちらかに焦点を合わせるにより所望の水平スライス画像が取得できる⁹⁾⁻¹¹⁾。

トモシンセシスはラミノグラフィと同じ方式であるが、照射角度、回転角度などの機構情報を基に画像処理して3次元画像として再構成するものである。ラミノグラフィとトモシンセシスは簡易CTともいうことができる。

ただし、これら立体画像検査装置の技術の有用性は十分としても、システムが複雑になりやすく、コストとスループットの面からインライン自動検査への普及には至っていない。

別の観点から見ると、X線CTの3次元データを基にして設計へフィードバックしたり、模擬的に試験、評価、シミュレーションしたりすることで、開発期間の短縮や効率、技術、信頼性の向上を目指した「リバースエンジニアリング」といわれる技術も普及しつつある。文献によれば、半導体解析のみならず、工業製品、医療分野、鋳造部品などへの応用が報告されている^{12), 13)}。

4.2 セラミックスへの応用

セラミックス製品は、半導体部品や電子部品の機能的部品として組み込まれ、年々、微細化や高機能化が進んでいる。セラミックスの強度は、微細な気孔、異物、クラック、剥離などの欠陥により大きく影響を受けるため、その解析には半導体部品と同様、 μm 単位の精度が要求される。

しかも、これらのセラミックス部品は、軽元素材や低密度材のみならず重元素をベースとしたものやガラス繊維複合材など複雑な構造となっており、確実な評価のためには工夫を凝らす必要がある。具体的には下記の手法が報告されている。

差分画像処理法は、積算画像から移動後の積算画像を差引くことにより欠陥だけの白黒ベア画像を得る方式である¹⁴⁾。

造影剤処理法は、セラミックス用の造影剤の利用により数 μm 単位の欠陥検出が可能となる

方式である¹⁵⁾。

5. ま と め

MFX線源を用いたX線検査は、半導体実装基板の微細化、軽量化、高密度化に伴う解析を主体として広く市場に認知され普及してきた。3次元画像構成による微細な構造解析の必要性から種々の方法が報告されているにもかかわらず、各手法の普及は今一つである。今後、MFX線源の性能向上、技術革新により、解析技術の高速化、低価格化、高分解能化が実現し、更なる市場拡大が進むことを期待したい。最後に、非破壊検査業界、エンドユーザからのご意見や厳しい要求があったからこそ、より良い製品の開発ができたものとここに深く感謝するものである。

文 献

- 1) 鈴木智之, 平野雅之, 古川光政, 中村 勤: ITE Technical Report, **19**(15), 1-6(1995)
- 2) 銅谷明裕: エレクトロニクス実装技術, **13**(10), 10-13(1997)
- 3) 花岡輝直, 伊東春樹: エレクトロニクス実装技術, **18**(4), 28-33(2002)
- 4) 山下雅之: エレクトロニクス実装技術, **18**(4), 20-21(2002)
- 5) 中村功二郎: *Electronic J.*, **88**(7), 164-165(2001)
- 6) 田中弘文: エレクトロニクス実装技術, **17**(11), 58-61(2001)
- 7) 小倉幸夫: 非破壊検査, **50**(5), 290-295(2001)
- 8) 藤井正司: 非破壊検査, **50**(5), 296-301(2001)
- 9) 小泉和人, 平嶋龍介, 池田 泰, 水田安俊: 日本非破壊検査協会平成13年秋季大会講演概要集, 173-176(2001)
- 10) 中村功二郎: *Electronic J.*, **100**(7), 117-118(2002)
- 11) 向山敬介: 電子技術, **44**(3), 26-30(2002)
- 12) 藤井正司: 非破壊検査, **50**(11), 698-703(2001)
- 13) 池田 泰, 永納保男, 河本 洋: 日本非破壊検査協会平成15年春季大会講演概要集, 61-64(2003)
- 14) 水田安俊, 恩田勝弘: 非破壊検査, **51**(7), 386-391(2002)
- 15) 真崎宏紹: 非破壊検査, **51**(7), 402-406(2002)