

非破壊サブミクロン分解能を実現する エキシラムの微小焦点 X 線管技術 Excillum' s microfocus X-ray tube technology for non-destructive submicron resolution

中野 朝雄 田中 志穂
A. Nakano S. Tanaka
エキシラム株式会社
Excillum AB

要約: 半導体の実装は個別機能をもつ Chiplet の接続により構成される GPU の出現や素子そのものの高性能化に伴い年々接続点数が増加している。基板への実装を含むこれらの製造プロセスの開発や品質保証には電気的接続検査に加え接続部位の形状の検査が必要であり、SEM や TEM と比較して試料処理が容易な高分解能X線3DCT 検査が望まれてきた。Excillum 社ではこの要望に応えるため、既存製品と比較して高輝度かつ微小焦点のX線管を開発した。開発した2種類のX線管を用いた3DCT 形状計測は 150nm 空間分解能を実現できる。

Abstract: The number of connection points for packaging of semiconductor devices is increasing rapidly by improving performances of chips and emerging GPU devices with chiplet packaging. Electric testing is required for the connection points is needed, but the profile measurement of those is also needed for the development of production process and the quality control of packaging of electric devices. Observation of the profiles by SEM and TEM are commonly applied but the strong demand to the X-ray 3DCT measurement with high spatial resolution exists because of ease for sample preparation. The nano- and micro-focused X-ray tubes with the highest brightness that Excillum has developed exhibit the maximum spatial resolution of 150nm and 3DCT measurements are possible.

キーワード: 半導体実装、Chiplet、X線3DCT、微小焦点X線管

Keywords: Semiconductor Packaging、Chiplet、X-ray 3DCT、Microfocus X-ray Tube

1. まえがき

携帯電子機器の発展により、回路基板上の部品は小型高機能化されるに伴い、電子回路実装は小ピッチ・多点接続化されてきている。従来、信頼性の高くない部品接続を半導体前工程の薄膜を用いた接続に置き換えることにより、高信頼化して高集積化し発展してきた半導体製造工程が技術的な限界や低コスト化実現のため Chiplet 実装に変革を始めている。これらの新たな接続方法を採用する実装接続プロセスの開発及び検査には電気的接続検査の他、SEM や TEM を用いた接続部位の観察や形状計測等が行われる。

SEM や TEM は空間分解能が高いが、対象部位が試料表面にある必要性から破壊分析であると同時に対象部位を観察可能とするために長時間を要するため、実装工程を含む半導体工場のバックヤードの技術者の負担は大きく、また、検査結果のフィードバック時間は期待されるほど短時間ではなかった。このような問題に対して、X線が透過する適度なサイズに切り

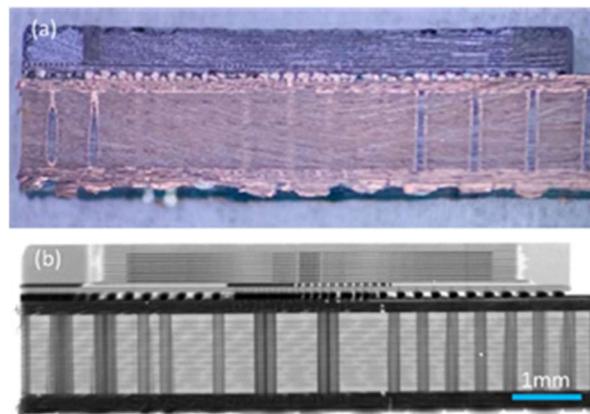


Fig.1 Optical Image (a) and X-ray image (b) of HBM

出した試料の X 線透過像は Fig.1 に示すように光学や電子線像と比較して、空間分解能に劣るが形状・寸法情報とともに X 線吸収量分布も含め情報量が多く、3DCT 撮像することにより目的の観察箇所を PC ディスプレイ上で探索でき観察準備時間が短縮できるというメリットがある。

本報告では、このような X 線撮像に最適な X 線管の技術を紹介するとともに、この X 線管を用いた撮像例について紹介する。

2. 高空間分解能を実現する微小焦点 X 線管技術

2.1 X線の発生領域と高輝度微小焦点化

X線はターゲットとなる物質に電子ビームやレーザーを照射し発生させる。発生するX線にはターゲット材料原子の電子軌道遷移による特性X線や、電子が電場で制動を受けて放射される制動輻射X線がある。これらのX線は全立体角に放射される。またこれらのX線の発生効率は低く、約99%は熱となり^[1]、X線を発生する部分の材料を加熱することになる。従って、単位面積あたりの強度が高い高輝度X線を取り出すX線管を実現するためには、X線発生部分を高熱に耐えられるような構造とすること及び冷却をどのように行うかが重要な課題となる。

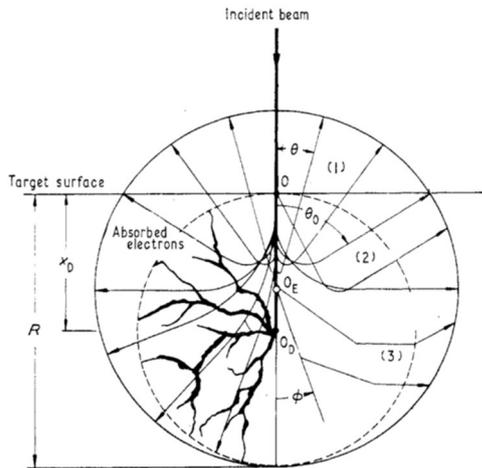


Fig.2 X-ray generation area by electron

電子ビームをターゲット物質に照射してX線を発生させる場合、Fig.2で示すように、表面Oから X_D の距離を電子が侵入し、X線を発生させながら固体内を球状に拡散し最終的に固体に吸収されるモデルがよく知られている^[2]。このX線発生モデルでは実験計測から得られた数値等をもとに下記の式でRと X_D が表され、X線を発生する部分はターゲット物質の密度(ρ)、原子番号(Z)、原子量(A)、照射電子エネルギー(E_0)により表される。

表1にターゲット物質の電子照射エネルギー

$$R = \frac{2.76 \times 10^{-11} A E_0^{5/3} (1 + 0.978 \times 10^{-6} E_0)^{5/3}}{\rho Z^{8/9} (1 + 1.957 \times 10^{-6} E_0)^{4/3}} \dots (1)$$

$$X_D = \frac{R}{1 + 0.187 Z^{2/3}} \dots (2)$$

に対する(1)と(2)から計算した例を示す。C(ダイヤモンド)は軽元素の例、Cuは分析用X線ターゲットの例、Wは撮像用X線ターゲットの例を示している。このX線発生モデルによれば、ターゲット物質が炭素(C)のような軽元素の場合、表面に入射した電子ビームは比較的長い距離(X_D)内部に侵入し、半径 $r (= R - X_D)$ の球状部分でX線を発生することになる。一方、ターゲット物質がタングステン(W)のような重元素の場合、入射した電子ビームの侵入距離(X_D)は短いものとなる。

Table.1 Calculated value for Target materials (unit : μm)

E_0 (kV)	Distance	C	Cu	W
70	R	25.5	11.0	6.4
	X_D	15.8	4.0	1.5
	$r=R-X_D$	6.4	7.0	3.8
160	R	80.2	41.1	24.0
	X_D	49.6	14.9	5.6
	$r=R-X_D$	30.6	26.2	18.4

式(1)によれば、照射電子ビームの加速電圧を上げるとX線を発生する領域の半径 r の球状部分の領域は大きくなる。また、制動輻射X線の光子数はターゲット物質の原子番号とともに大きくなるので、タングステン(W)のような重元素が有利となる。非破壊分析等に用いられるX線管には高電圧で動作させ、高エネルギーX線光子の発生が多いタングステン(W)をターゲットとしたX線管が用いられる。

2.2 Excillum 社の高輝度微小焦点X線管

X線の発生そのものは物理的に単純であるが、X線光子数をより多く取り出す高強度、あるいはX線焦点の単位面積当たりの光子数を高くする高輝度のX線源を構成するとき、照射エネルギーが微小部分で熱変換されるためターゲット物質の冷却が非常に重要となる。Excillum 社では 300nm と 20-30 μm X線焦点径のX線管開発にあたり、異なる冷却方法を採用した。

焦点 300nmX線管では、X線の発生を電子が散乱しない程度の厚さのタングステン(W)薄膜で行い、電子ビームによる熱発生を熱伝導率が高いダイヤモンド・ターゲット(C)内部で行うこと

Table 2 Comparison of typical X-ray tubes

	NanoFocus	μ Focus	μ RAG		MetalJet	
HV-W	160kV-11W	60kV-30W	60kV-1,200W	60kV-2,970W	70kV-120W	160kV-1,000W
Focus size	ϕ 300nm	ϕ 30 μ m (15°)	ϕ 70 μ m (5~6°)		ϕ 10 μ m (15°)	ϕ 30 μ m (15°)
Irradiation Area	ϕ 300nm	30x120 μ m ²	70x700 μ m ²	70x700 μ m ²	10x40 μ m ²	30x120 μ m ²
Type	Transmission	Fluid	Rotation + Fluid		Liquid metal alloy + Jet	
Line Velocity	—	—	63m/s	130m/s	75m/s	
Load density	(150MW/mm ²)	8.3kW/mm ²	31kW/mm ²	67kW/mm ²	313kW/mm ²	278kW/mm ²
Limit factor	Target Thickness	Melting Point	Target mechanical strength		Target Boiling Point	

により熱拡散を行い、高いX線輝度が得られるような透過型 NanoFocus X線管(NanoTube)を開発した。このX線管は160kVの印加電圧でも原理上300nmの最小X線焦点サイズを実現可能であり、導電性のあるダイヤモンド・ターゲットはX線取り出し窓も兼用する構成となっている。

また、Siウエハの透過率が比較的高い25keV付近のX線を発生するインジウム(In)はガリウム(Ga)及び錫(Sn)の3元合金で室温に近い温度で液体合金となるため、この液体金属をX線ターゲットとして焦点径20-30 μ mで従来の固定或いは回転ターゲット型 μ Focus管より輝度の高いX線管を開発した。3元合金の平均原子番号は40.7であり、70kV電子ビームに対するInK線の発生領域の2rは10 μ m、同様に160kVの2rは30 μ m程度となる。細い液体金属を真空中に高速で噴出した液体金属ジェットをX線ターゲットとしたMetalJetX線管はターゲットの金属融点や機械的強度による熱負荷の限界を超え、金属沸点が熱負荷限界となるため、従来技術と比較して大きな単位面積当たり電子ビーム負荷が可能となり、Table.2に示すようにX線輝度が大幅に向上した。

3. Excillum社高輝度微小焦点X線管を用いた3DCT撮像例

3.1 MetalJetX線源による3DCT撮像例

MetalJetX線管は非常に輝度が高く、短時間での高分解能3DCT撮像データの取得が可能である。30 μ mX線焦点での撮像では15 μ m空間分解能が期待でき、接続バンプの形状やワイヤボンディングの状態の観察が可能である。Fig.3に3DCT撮像装置の構成を示す。中央に回転可能な形でスマートホンが設置され、X線焦点

と試料回転軸間距離を160mm、試料回転軸とX線検出器間距離を522mmとした。

X線発生装置はMetalJet160kV-1,000W(6.25mA)であり、FlatPanelX線検出器を用いた。撮像系の倍率は3.26であり、100fpsの撮像で2,000frameの3DCT撮像を行った。スマートホンの端部にあるカメラ部分の撮像を主目的とした。

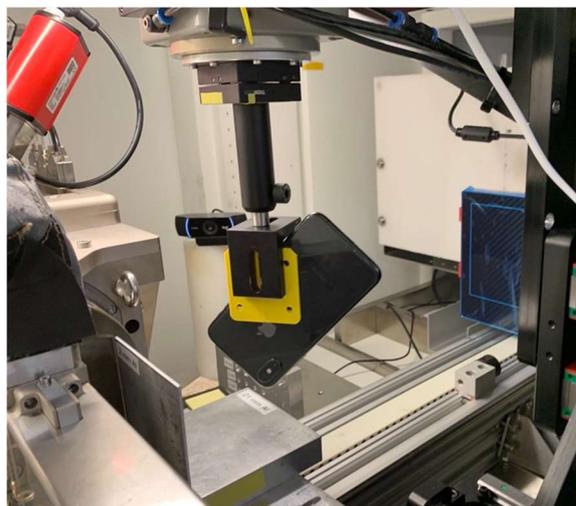


Fig.3 Setup of 3DCT X-ray measurement system

Fig.4に断面像及び3DCT再構築像を示す。3DCTデータの画像再構築により、基板上面での電子部品の接続状態、基板内部のスルーホール、基板裏面での接続状態等が非破壊で観察可能である。本撮像に要した時間は20秒であり、空間分解能15 μ m程度の非破壊故障解析等に短時間で対応が可能です。

更に、高分解能化の可能性を確かめるため同じ測定Setupで100fps、100frame撮像での3DCT再構成画像を確かめた。測定時間は1秒、Fig.5に撮像結果を示す。この像はFig.4右下の像に相当するものであり、測定データ量

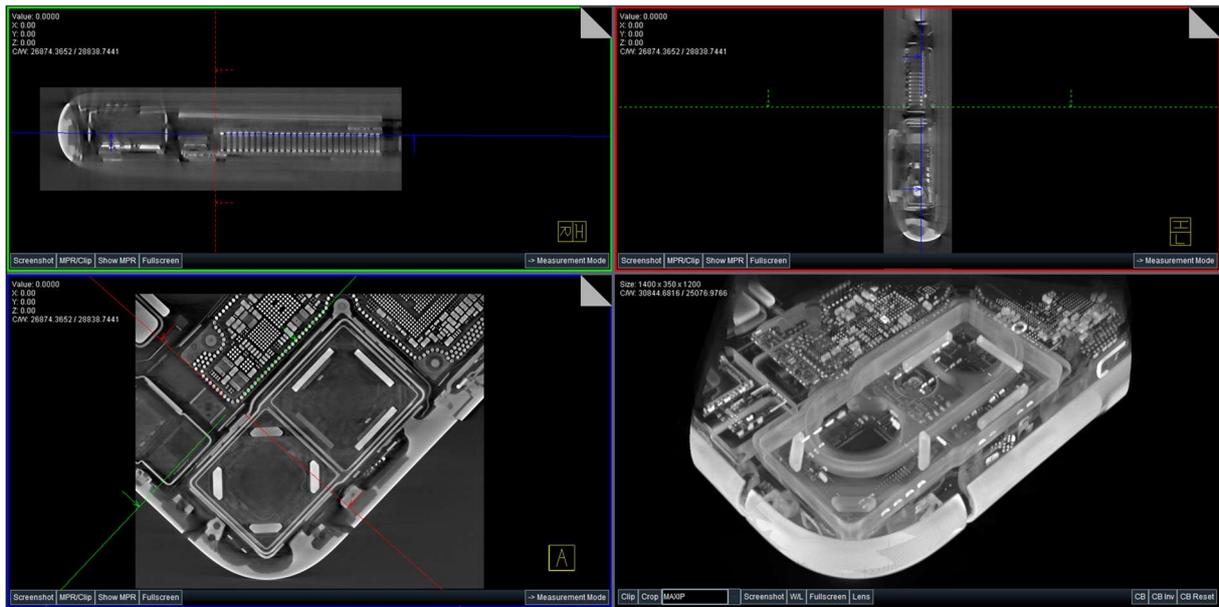


Fig.4 Section and 3D reconstruction X-ray Images measured using MetalJet X-ray source

が 1/20 でも相応の精度での測定が出来ている。

MetalJet X線源は電子ビーム印加電力 70kV-120W (1.71mA)、10 μ m X線焦点としての動作が可能であり、この動作条件で拡大倍率 10 倍、40 秒間の測定で Fig.5 の画像と X線検出器への X線光子入射条件が同等となり、今回用いた 3DCT 測定系で、空間分解能 5 μ m の撮像が実現できることを意味する。

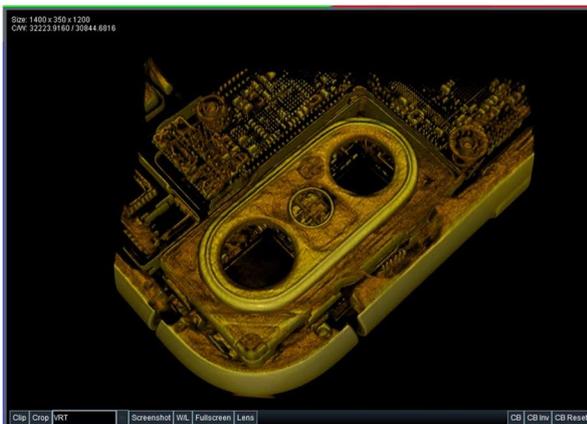


Fig.5 3D reconstruction X-ray Images measured in 100 fps and 100 frames

3.2 NanoTubeX線源による3DCT 撮像例

NanoTube は 160kV までの印加が可能な焦点径 300nm の X線管であり、MetalJet と比較して最大印加電力が 11W と低く X 線のフラックスが小さいが、空間分解能 150nm の 3DCT 撮像が可能な測定装置を構築可能である。

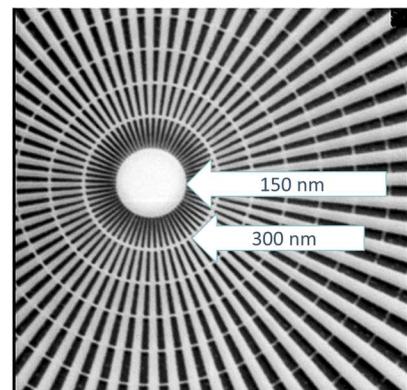


Fig.6 X-ray Image of Siemens chart measured by NanoTube X-ray source

Fig.6 に Siemens Star Chart の測定結果を示します。最内周のパターンが明瞭に分離できていることがわかる。この高空間分解能測定系を用いて半導体のパッケージを測定した例を Fig.7 に示す。ワイヤボンディング、Interposer、 bumps 接続や再配線層などが明瞭に撮像され

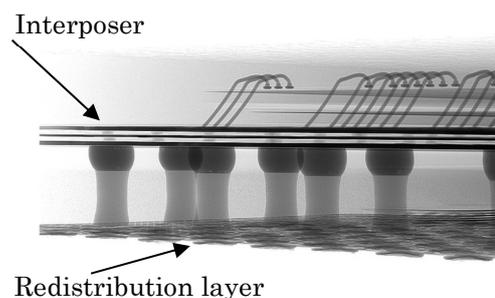


Fig.7 X-ray Section Image of semiconductor device package

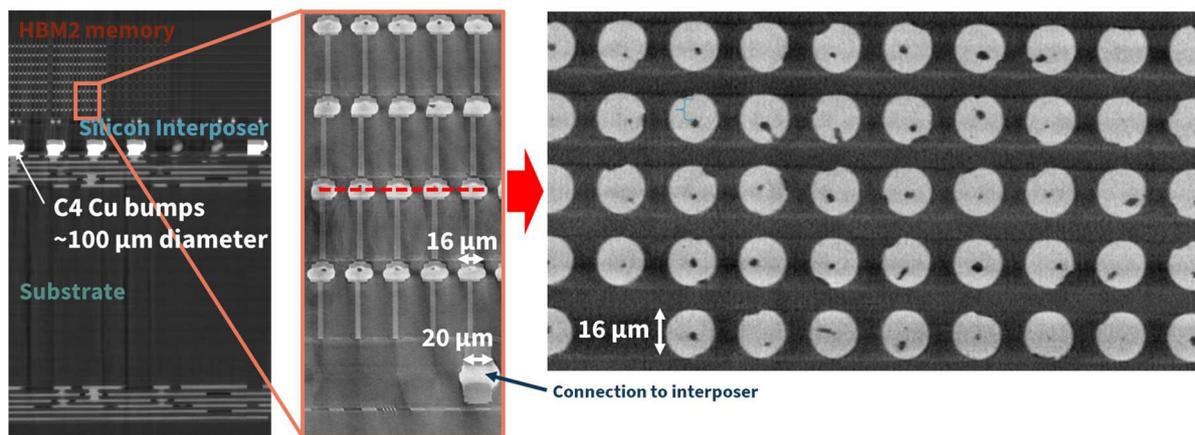


Fig.8 3D reconstruction X-ray Section Image of semiconductor device package with HBM

ていることがわかる。

Fig.8 には HBM が実装された半導体チップを3DCT 撮像し、再構成した像を示す。この撮像では NanoTube を用い、X 線焦点サイズ 500nm とし、高空間分解能3DCT を狙ったものである。TSV とマイクロバンプによる接続、シリコンインターポザーと C4 接続の様子が3D 観察可能である。TSV とマイクロバンプ接続では、マイクロバンプ層での断面像で、はんだ内部にサブミクロンサイズの気泡が広範に観察される。

4. まとめ

ここに示したように、X 線による3DCT 撮像は比較的広い領域の構造を一度に観察することが可能である。観察領域は X 線検出器のピクセル数と分解能から決まり、150nm 分解能で一辺が 2,000 ピクセルならば 0.3mm 角、5 μ m 分解能ならば 10mm 角部分を観察可能である。実際には X 線の吸収の関係から深さ方向は 3-5mm 程度が限界となる。上記のサイズの試料を非破壊・高空間分解能かつ短時間で3DCT 観察できる方法は有用であり、とくに今後ますます重要となる Chiplet 半導体の開発・検査・品質管理・製造工程管理の必須計測手法となる。

高空間分解能かつ短時間測定に最も重要な要素は X 線源の高輝度化である。本報告ではダイヤモンド・ターゲット上にタングステン薄膜を形成した透過型 NanoFocus X 線管と液体金属ジェットをターゲットとした μ Focus X 線管を用いた 3DCT 撮像とその応用例を示した。これら Excillum 社の X 線管は X 線の発生原理から詳細

に検討されたものであり、シンクロトロン放射光を除く X 線源の中で最も高輝度という特性をもつ^[3]。

本報告で紹介した高輝度 X 線管は分析・故障解析だけでなく工場の生産現場でも採用され、生産プロセスの評価・管理の高度化を通して、より安全・安心な社会の構築に貢献することを目指している。

謝辞

本研究を行うにあたり、試料を提供していただいた Excillum 社 (Jan Stenbecks Torg17, 164 40 Kista, Sweden) CTO Bjoern Hasson 博士、製品責任者の Per Takman 博士及び Daniel Nilsson 氏に技術知見及び実験データ等の提供を頂いた。心より感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 仁田勇 監修, “X 線結晶学”, 丸善株式会社, 1959.
- [2] K. Kanaya and S. Okayama, “Penetration and energy-loss theory of electrons in solid targets”, J. Phys. D: Appl. Phys. Vol.5, pp. 43-58, 1972.
- [3] 中野朝雄, “溶融金属ターゲット 20 μ m 径及び透過型 300nm 径の焦点をもつ高輝度 X 線発生装置”, 非破壊検査, Vol.72, No.5, pp.174-180, May 2023.