

ASPENCORE

電子工程專輯

EE Times Taiwan

www.eettaiwan.com

2022年8月

異質整合當道 材料接合應力強度備受矚目

思維與觀點

為何執行RTOS的DSP是物聯網最佳選擇？

業界趨勢

淺談量子運算技術現況與未來發展前景

精英訪談

理性應對全球GPU供應格局

設計新技術

善用數據和專業知識

引導Smith中國辦事處的電子元件經銷

ISSN 1684-1131



08

9 771684 113003



INTEGRATED
SERVICE
TECHNOLOGY

宜特科技

封面故事

異質整合當道 材料接合應力強度備受矚目

安東帕、宜特科技供稿

不同種類的材料封裝在一起，衍生挑戰接踵而至，如何確保異質整合元件的可靠度？如何量測材料間的附著能力與結合強度？

隨著5G、人工智慧(AI)等新興科技應用興起，半導體製程持續微縮，對封裝的要求也愈來愈高，具備高度晶片整合能力的「異質整合」封裝技術，被視為後摩爾時代下延續半導體產業發展的動能。所謂「異質整合」為將兩個、甚至多個不同性質的主動與被動電子元件，整合進系統級封裝中(System in a package, SiP)。

然而，欲將不同種類的材料封裝在一起，衍生的挑戰亦接踵而至。舉例而言，在覆晶封裝(Flip Chip Package, FCP)中，底部填充劑(Underfill)的選擇就會影響異質整合元件的可靠度，在宜特可靠度驗證分析實驗室裡，常見異質整合元件的故障模式，包括填料沉降(filler settling)、空隙(void)與翹曲(Warping)產生，因此，若能掌握Underfill的流變特性，對於製程優化有所助益(延伸閱讀：如何利用真空壓力烤箱消滅Underfill Void)。

另一方面，在異質整合先進封裝技術中，表面的機械特性與異質材料間界面的附著能力，將影響元件可靠度。本文為宜特科技(iST)與安東帕(Anton Paar)合作，將介紹如何藉由分析工具，確認異質整合元件



材料中Underfill的流變特性，以及金屬銅、介電材料等的接合應力強度。

如何量測Underfill材料流變特性：動態剪切流變儀

材料的流變特性，主要用來描述材料受到應力後產生流動或形變行為，對於「流體」而言，常用「黏度」來表示流體受力後流動的難易程度；而對於「黏彈體」則使用「儲存模數」(Storage module)，以及「耗散模數」(Loss module)表示。可透過動態剪切流變儀來進行試驗。

在FCP製程中，Underfill是用來填充晶片與基材中間的空隙，其通常是由環氧樹脂(Epoxy)作為基材並添加矽粒子降低填充劑的熱膨脹係數。首先將Epoxy塗抹在晶片的邊緣，再透過毛細作用讓材料自動滲透到覆晶晶片的底部，之後再加熱予以固化。

為了降低製程時間及增加生產力，新一代的Underfill黏度越做越小，然而此方法對於添加物的懸浮穩定造成負面的影響，添加物於黏度較低的材料中易於沉降。因此，如何克服填料沉降，以及減少空隙的出現為一重要的議題。

以下為利用流變儀，探討三種不同的底部填充劑(Underfill A、Underfill B，以及Underfill C)的流動特性。**圖1**為此三種材料的黏度曲線，由結果可發現此三種填充劑的流變特性非常不同，Underfill A為「牛頓流體」、Underfill B和Underfill C則於高剪切力下呈現「剪切增稠」行為。除此之外，三款Underfill皆具有「降伏應力」(Yield Stress)。

綜合實驗結果可發現，Underfill中添加劑的含量多寡對填充劑的流變行為有非常顯著的影響，如**圖2**所示，在添加物含量在40%以下時，Underfill呈現「牛頓流體」的流動行為；當添加物含量大於60%後，Underfill的黏度會隨著剪切力的改變而改變；當添加物含量高於73%以上後，在剪切速率大於51/s後，黏度會隨著剪切率的上升而上升，呈現剪切增稠的流變行為。此外，具有降伏應力，以及快速的流動特性的Underfill能降低填充劑沉降發生的機率。

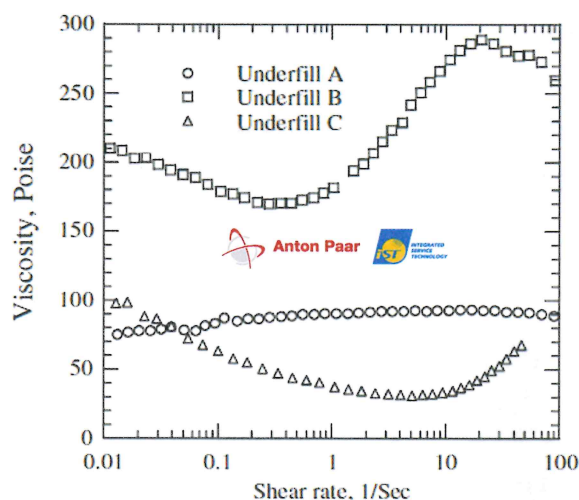


圖1：三種不同的Underfill於25°C下的黏度曲線。

(來源：Microelectronics Reliability 47(12):1958-1966)

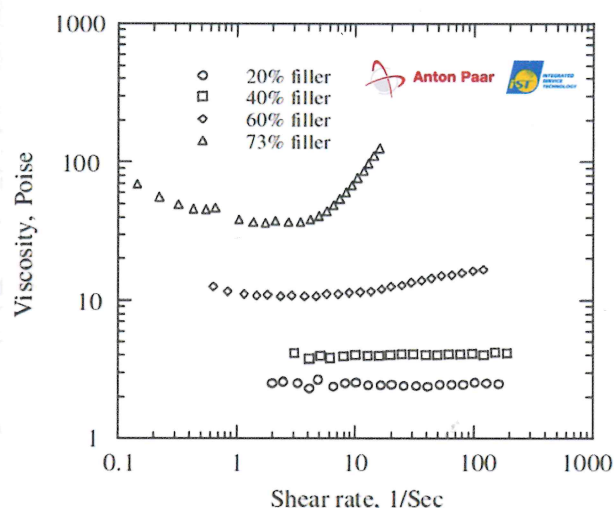


圖2：添加劑的含量對於Underfill流變特性的影響。

(來源：Microelectronics Reliability 47(12):1958-1966)

如何量測異質整合材料間的附著能力與結合強度：壓/刮痕測試儀

異質整合技術涉及到將具有不同特性的材料整合在一起，因而材料與材料之間的附著能力，以及結合強度為影響元件可靠度的重要因子之一。

壓痕測試技術為可精準測量出薄膜、塗層，以及塊材的機械特性方法。不論是軟質(Soft)、硬質(Hard)、具脆性(Brittle)亦或具延展性(ductile)的

材料，其力學特性包含硬度(Hardness)、彈性模數(Elastic modulus)、彈性和塑性功(Elastic and plastic work)或是蠕變(Creep)特性等皆可得到。

傳統的壓痕測試方法為透過已知幾何形狀的壓頭(indenter)，於材料表面上施加預設載荷(Load)壓入材

料，並藉由測量壓痕塑性變形面積得到材料的硬度。然而，在微米及奈米的尺度下，由於產生的壓痕很小，不易準確地測得壓痕面積，用傳統的測試方法無法得到微米/奈米材料的硬度。

因此，微米/奈米壓痕測試儀具有精密的應力和深度感測器，可精準地控制壓頭進行載入與卸載的過程，並於過程中同時記錄載荷及壓入深度。透過圖3所示之「連續荷載-壓深曲線」，並透過理論模型，可計算出材料的力學特性。

最常用的模型為Oliver-Pharr方法。於此模型中，可在連續荷載-壓深曲線得到壓頭下壓過程中做的總功和產生塑性變形的功，除了可計算出材料的硬度值外，亦可得到其他力學參數。其相關計算內容於圖4所示。

此外，若要量測塗層的附著力和結合強度與抗刮能力，刮痕測試儀為公認的塗層材料測試方式。

利用刮痕測試儀來研究異質材料間的附著能力已廣泛地被應用在汽車，以及顯示面板產業中，舉例而言，圖5為利用刮痕測試儀，測試智慧型手機面板玻璃的抗刮能力，此玻璃表面具有厚度約為100奈米(nm)的氧化鋁保護層，實驗中採用半徑為2微米(μm)的球錐形狀(Sphero-conical)刮頭，刮頭的最大載荷力量為50毫牛頓(mN)。

圖6(左)為於玻璃表面創造出的刮痕及其失效模式，圖6(右)為正向作用力與下壓深度(Pd)、殘留深度(Rd)，以及磨擦係數(CoF)的變化。在臨界載荷位置(大約44毫牛頓)，可觀察到塗層失效行為，與此同時，可觀察到下壓深度、殘留深度，以及磨擦係數亦有顯著的變化。若要得到具有良好附能力的塗層，臨界載荷位置越大越好。

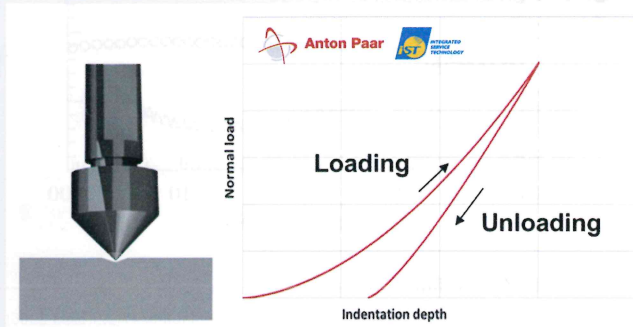


圖3：連續荷載-壓深曲線示意圖。(來源：Anton Paar)

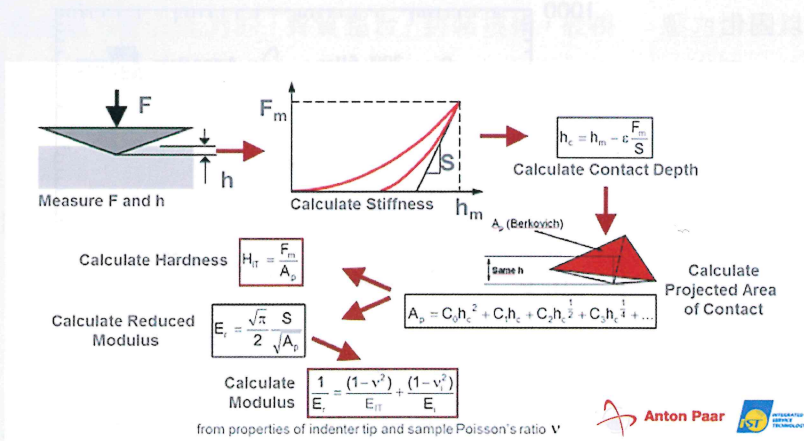


圖4：奈米壓痕技術求之力學參數計算說明。(來源：Anton Paar)

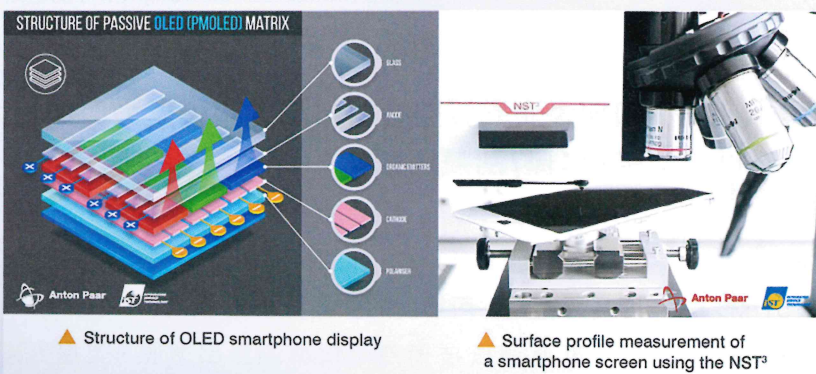


圖5：手機面板表面100nm厚的氧化鋁保護層的刮痕測試。(來源：Anton Paar application report: Mechanical surface characterization of smartphone displays)

如何計算3D封裝矽通孔中銅的力學特性

3D封裝為達成異質整合重要的技術，於3D封裝技術中，矽通孔(Through Silicon Via, TSV)為實現晶片垂直整合的主要技術，製作完成的TSV結構具有許多的金屬界面，在矽通孔中銅金屬的擴散作用以及銅晶粒的大小對於銅的力學特性有很大的影響。因此，若能正確的建立矽通孔中銅的力學特性，對於TSV結構的可靠度分析和設計有顯著的幫助。一般而言，金屬材料的應力-應變(σ - ϵ)關係可由以下方程式表示：

$$\sigma = \begin{cases} E\epsilon & (\sigma \leq \sigma_y) \\ R\epsilon^n = \sigma_y \left(1 + \frac{E}{\sigma_y} \epsilon_p\right)^n & (\sigma > \sigma_y) \end{cases}$$

其中，E為彈性模量、R為強度係數、n為應變強度指數、 σ_y 為降伏強度、 ϵ_y 為於 σ_y 下所得的降伏應變、 ϵ_p 為總應變中大於 ϵ_y 部分的有效應變。由此假設可知，材料的E值可由奈米壓痕實驗得到，其他參數可由模型與有限元素分析法求得。搭配這些方法則可得到TSV-銅(Cu)的應力-應變關係。

為了求得TSV-銅的彈性模量，使用奈米壓痕測試儀搭配Berkovich壓頭，在TSV-銅外露表面靠近圓心位置進行奈米壓痕實驗，壓入深度為500奈米。所得材料的彈性模量，以及硬度，如表1所示。

有了此結果並搭配有限元素分析方法可進一步地推算出材料的應力-應變曲線，如圖7所示，計算出TSV-銅的彈性模量、應變強度指數與降伏強度分別為155.47 GPa、0.4892和47.91 MPa。

如何測試介電材料固化溫度對於表面硬度的影響

扇外型晶圓級封裝(Fan-Out wafer level package, FOWLP)為新穎性封裝技術，於此製程中，重分佈層(redistribution layer, RDL)的製備為一關

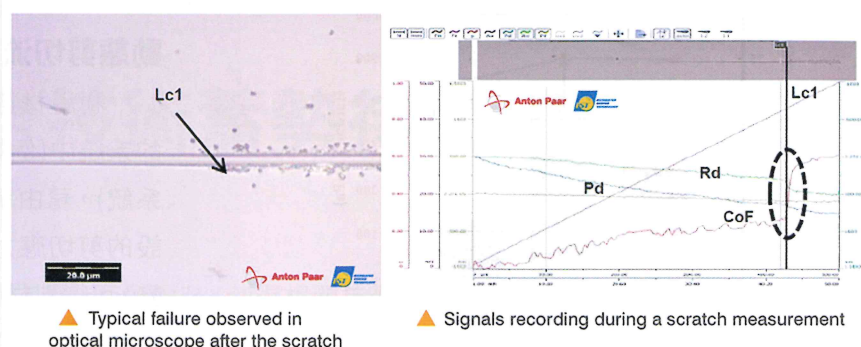


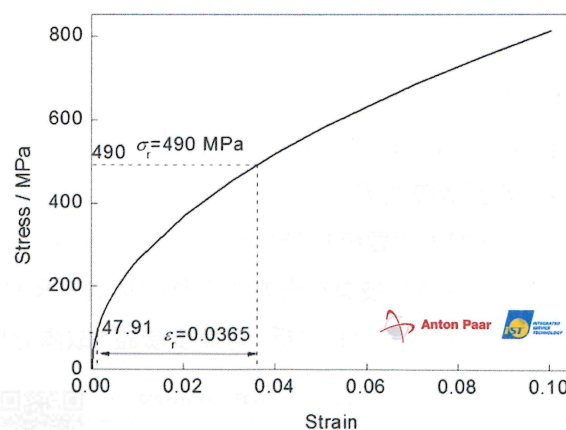
圖6：100nm氧化鋁護層之刮痕測試的結果：(左) OM觀察刮痕失效的影像，(右)力與位移的訊號。

(來源：Anton Paar application report: Mechanical surface characterization of smartphone displays)

Elastic modulus E and hardness H of TSV-Cu

Sample	E/GPa	H/GPa
1	152.08	2.69
2	158.56	2.28
3	154.42	2.45
4	158.73	2.35
5	159.01	2.58
6	155.71	2.65
7	154.72	2.41
8	150.55	2.31
Average	155.47	2.47

表1：TSV-銅的彈性模量E與硬度H。



Stress-strain curve for TSV-Cu ($\sigma = \sigma_y(1 + \frac{E}{\sigma_y} \epsilon_p)^n$, $E=155470$ MPa, $\sigma_y=47.91$ MPa, $n=0.4892$)

圖7：TSV中金屬銅的應力-應變曲線。(來源：2014《金屬學報》50(6): 722-726)

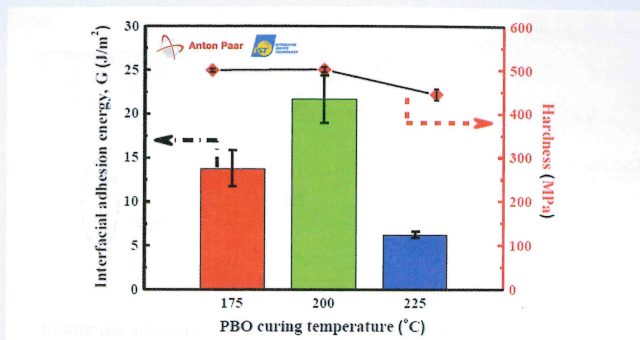


圖8：PBO 固化溫度與表面硬度的關係。

(來源：Effect of dielectric process on the interfacial adhesion of RDL for FOWLP, 2377-5726/20/\$31.00 ©2020 IEEE)

鍵步驟。而於FOWLP中，其RDL一般由介電材料(如PI、PBO)與銅所組成，若要得到具有可靠度良好的產品，介電材料與銅之間需有很強的附著能力，以能承受可靠度測試中高溫高濕的考驗。因此，在此實例中，可利用奈米壓痕測試儀了解不同的固化溫度對於材料硬度的影響，此實驗搭配Berkovich壓頭，控制最大壓深深度為500奈米，針對不同固化溫度的PBO進行分析。實驗結果顯示PBO的硬度隨著固化溫度上升先是持平後，到225度而開始下降(如圖8所示)。除了了解PBO機械特性以外，未來亦可搭配刮痕測試儀進一步地量測出RDL銅與介電材料的附著能力，進而將製程最佳化。

在先進異質整合封裝的產品技術開發階段，除了前述的材料分析技術之外，宜特科技實驗室也有提供相關Underfill改善空隙發生的製程技術，以及採用四點探針彎曲測試金屬與介電材料間附著力的多年經驗；不但能輔助提供材料的機械性質外，還可搭配相關的熱性質、可靠度、壽命測試等，以完成產品的所有驗證。一旦經過高溫、高濕、或震動測試後才導致故障失效，就需要找出並探究產品故障的因子，作為材料微調或製程改善的依據。因此，如果想要縮短產品開發的時程，節省設備成本的耗費，宜特科技具有全方位完整的解決方案，能夠提供以上各種相關材料分析、可靠度驗證、故障分析的服務，以滿足

客戶所要的規格與需求。EET

觀看更多「宜特技術小學堂」，
請參閱：<https://www.istgroup.com/>

tw/tech-articles/



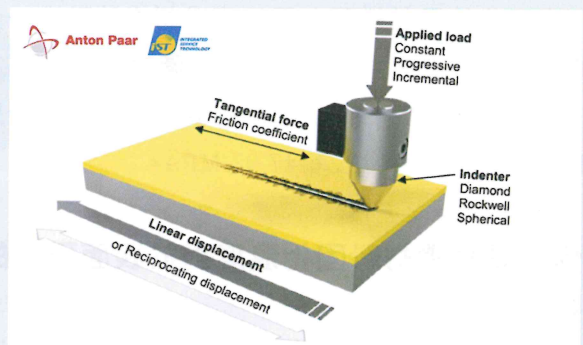
(本文由宜特科技提供)

動態剪切流變儀實驗原理

利用材料放置於一個幾何形狀皆被定義好的系統中(例如：錐板量測系統、同心圓柱量測系統)，藉由精密的馬達控制系統，給予材料預設的剪切應力，量測材料所相應產生的剪切應變，可得到材料的相關流變特性包含儲存模數、耗散模數、或者阻尼因子。除此之外，由於流變儀可搭載不同的控溫系統，除了了解材料的本質特性以外，亦可用來模擬材料於製程中受力下的流變行為變化。

刮痕測試儀實驗原理

利用一已知形狀的鑽石壓頭壓在待測表面上，當待測樣品以預設的速度移動時，壓頭會於待測表面留下刮痕(如下圖所示)。於下壓過程中，若施加在壓頭的載荷為一恆定值，可測試材料刮痕硬度或是抗刮能力；若施加在壓頭的載荷逐漸增加，並於此過程中同時記錄正向作用力與磨擦力、下壓深度，以及聲波訊號的變化，則可用來了解材料的附著能力。一般而言，在低載荷作用下，塗層可以抵抗載荷而呈現完好狀態，然而，隨著載荷增加，材料受到的應力隨之增加。當材料到達臨界載荷(Critical load, Lc)時，會於該處觀察到塗層產生裂紋、變形、破裂等失效模式。最終，塗層會在更大的載荷作用下開始脫落。



刮痕測試儀原理示意圖。

(來源：Anton Paar)